

Ray Kurzweil

Menschheit 2.0

Die Singularität naht

lola
books



RAY KURZWEIL

Menschheit 2.0

Die Singularität naht

Aus dem Englischen von
Martin Röttschke

**lola
books**

2., durchgesehene Auflage 2014
Copyright © Lola Books GbR, Berlin 2013
www.lolabooks.eu

Dieses Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt und darf in keinerlei Form ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Titel der englischen Originalausgabe:
The Singularity is near: when humans transcend biology
Copyright © Ray Kurzweil, 2005
Published by Arrangement with Ray Kurzweil
Dieses Werk wurde vermittelt durch die Literarische Agentur
Thomas Schlück GmbH, 30827 Garbsen.
Alle Rechte vorbehalten

Umschlagdesign: Christine Wenning
ISBN 978-3-944203-08-9
eISBN 978-3-944203-13-3

Inhalt

Danksagung

PROLOG

Die Macht der Ideen

KAPITEL 1

Die sechs Epochen

Intuitiv-lineare versus historisch-exponentielle Betrachtung

Die sechs Epochen

Die Singularität ist nah

KAPITEL 2

Eine Theorie der technischen Evolution: Das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs

Die S-Kurve als technologischer Lebenszyklus

Das Moore'sche Gesetz und mehr

Das Moore'sche Gesetz: eine selbsterfüllende Prophezeiung?

Fraktaldimensionen und das Gehirn

DNS-Sequenzierung, Speicher, Kommunikation, das Internet und Miniaturisierung

Information, Ordnung und Evolution: Wolframs Überlegungen und Fredkins Zelluläre Automaten

Die Singularität als Wirtschaftsprinzip

KAPITEL 3

Wann Computer die Rechenkapazität des Menschen erreichen

Das sechste Paradigma der Rechnertechnik: Dreidimensionale Molekularchips und neue Berechnungsmethoden

Die Rechenkapazität des menschlichen Gehirns

Grenzen der Berechnung

KAPITEL 4

Intelligente Software: Ein Reverse Engineering des Gehirns

Reverse Engineering des Gehirns: ein Überblick

Ist das Gehirn ein Computer?

Das eigene Denken verstehen

Ein Blick ins Gehirn

Gehirnmodelle

Die Gehirn-Maschinen-Schnittsstelle

Ein Reverse Engineering des Gehirns – mit wachsendem Tempo

Gehirn-Upload

KAPITEL 5

GNR: Drei ineinandergreifende Revolutionen

Genetik: Die Schnittmenge aus Biologie und Informatik

Der Computer des Lebens

Nanotechnik: Schnittmenge aus Information und physikalischer Welt

Robotik: Starke KI

Remis gegen Deep Fritz – werden Menschen schlauer oder Computer dümmer?

KAPITEL 6

Die Folgen...

...für den menschlichen Körper

...für das menschliche Gehirn

...für die Lebenserwartung

...für die Kriegsführung: Fernsteuerung, Robotik, Robustheit, Miniaturisierung und virtuelle Realität

...für die Bildung

...für die Arbeit

...für das Spielen

...für das kosmische Schicksal: Weshalb wir wahrscheinlich alleine sind im Universum

KAPITEL 7

Ich bin ein Singularitarist

Die lästige Bewusstseinsfrage

Wer bin ich? Was bin ich?

Die Singularität als Transzendenz

KAPITEL 8

Die eng verwobenen Nutzen und Gefahren von GNR

Der Nutzen ist eng verknüpft...

...mit den Gefahren

Eine Palette von Existenzbedrohungen

Wie wir uns wappnen

Die Idee der Regulation

Entwicklung von Schutztechniken und die Auswirkungen von Regulationen

Ein GNR-Schutzprogramm

KAPITEL 9

Antworten auf Kritik

Ein Überblick

Zweifel an der Glaubwürdigkeit

Kritik nach Malthus

Software-Kritik

Kritik zu Analog-Verarbeitung

Kritik zu Komplexität neuronaler Verarbeitung

Kritik zu Mikrotubuli und Quantenberechnung

Die Church-Turing-These

Kritik zu Fehlerquoten

Lock-in-Effekt

Ontologie-Kritik: Kann ein Computer bewusst sein?

Die Schere zwischen Arm und Reich

Zu erwartende staatliche Regulationen

Theistische Kritik

Holismus-Kritik

Epilog

Zusätzliche Informationen und Kontakt

ANHANG

Ein zweiter Blick auf das Gesetz vom steigenden
Ertragszuwachs

Anmerkungen

Index

Danksagung

Mein tiefster Dank gilt meiner Mutter Hannah und meinem Vater Frederic, die schon früh all meine Ideen und Erfindungen rückhaltlos unterstützten und mir stets Freiraum für Experimente ließen; meiner Schwester Enid für ihre Inspiration; meiner Frau Sonya und meinen Kinder Ethan und Amy, die mein Leben mit Sinn, Liebe und Motivation erfüllen.

Außerdem möchte ich den vielen talentierten und engagierten Menschen danken, die mir bei diesem komplexen Projekt zur Seite standen:

Bei Viking: Meinem Redakteur Rick Kot, für seine Anleitung, seinen Enthusiasmus und seine einsichtige Redaktion; meiner Verlegerin Clare Ferraro für ihre Unterstützung; meinem kompetenten Lektor Timothy Mennel; Bruce Giffords und John Jusino, für die Koordination der unzähligen Details einer Buchproduktion; Holly Watson, für ihre effiziente Öffentlichkeitsarbeit; Rick Kots fähiger Assistentin Alessandra Lusardi; Paul Buckley, für seine klaren und eleganten Grafiken; und Herb Thornby, für den Entwurf eines ansprechenden Covers.

Meiner Agentin Loretta Barrett, die mir bei diesem Projekt mit enthusiastischer und scharfsinniger Beratung zur Seite stand.

Dr. med. Terry Grossman, meinem Mitstreiter bei medizinischen Themen und Mitautor von *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever*, für seine Hilfe bei der Entwicklung von Ideen zu Gesundheit und Biotechnik in zehntausend E-Mails hin und zurück, und für eine vielfältige Zusammenarbeit.

Martine Rothblatt für ihren Beitrag zu allen in diesem Buch beschriebenen technischen Errungenschaften und für ihre Zusammenarbeit bei diversen eigenen Entwicklungen in diesen Bereichen.

Aaron Kleiner, meinem langjährigen Geschäftspartner (seit 1973) für seine Hingabe und Mitarbeit in zahlreichen Projekten, einschließlich diesem.

Amara Angelica, deren engagierte und einsichtsvolle Bemühungen unser Recherche-Team anführten. Amara unterstützte mich mit ihren außerordentlichen redaktionellen Fähigkeiten bei der Artikulation komplizierter Sachverhalte. Kathryn Myronuk, die mit ihrer engagierten Recherchearbeit einen großen Beitrag zu den Nachforschungen und den Anmerkungen leistete. Sarah Black trug ebenfalls entscheidend zu Recherche und Redaktion bei. Mein ganzes Recherche-Team hat großartige Arbeit geleistet: Amara Angelica, Kathryn Myronuk, Sarah Black, Daniel Pentlarge, Emily Brown, Celia Black-Brooks, Nanda Barker-Hook, Sarah Brangan, Robert Bradbury, John Tillinghast, Elizabeth Collins, Bruce Damer, Jim Rintoul, Sue Rintoul, Larry Klaes, und Chris Wright. Zusätzlich assistierten Liz Berry, Sarah Brangan, Rosemary Drinka, Linda Katz, Lisa Kirschner, Inna Nirenberg, Christopher Setzer, Joan Walsh, und Beverly Zibrak.

Laksman Frank, der viele der attraktiven Diagramme nach meinen Beschreibungen erstellte und die Schaubilder formatierte.

Celia Black-Brooks, für ihre Führungsarbeit in Projektentwicklung und Kommunikation.

Phil Cohen und Ted Coyle, für die Umsetzung meiner Ideen für die Illustration auf **Seite 327**, und Helene DeLillo, für das „The Singularity Is Near“-Foto zu Beginn von **Kapitel 7**.

Nanda Barker-Hook, Emily Brown und Sarah Brangan, die mir halfen, die umfangreiche Logistik des Recherche- und Redaktionsprozesses zu regeln.

Ken Linde und Matt Bridges, die mit ihrer IT-Unterstützung einen störungsfreien Arbeitsablauf ermöglichten.

Denise Scutellaro, Joan Walsh, Maria Ellis und Bob Beal, welche die Buchhaltung für dieses komplizierte Projekt übernahmen.

Das KuzweilAI.net-Team, für erhebliche Unterstützung bei den Recherchen: Aaron Kleiner, Amara Angelica, Bob Beal, Celia Black-Brooks, Daniel Pentlarge, Denise Scutellaro, Emily Brown, Joan Walsh,

Ken Linde, Laksman Frank, Maria Ellis, Matt Bridges, Nanda Barker-Hook, Sarah Black und Sarah Brangan.

Mark Bizzell, Deborah Lieberman, Kirsten Clausen und Dea Eldorado, für ihre Hilfe bei der Kommunikation der Message dieses Buches.

Robert A. Freitas Jr., für die eingehende Prüfung des Nanotechnik-Materials.

Paul Linsay, für seine gründliche Prüfung der Mathematik in diesem Buch.

Meinen Kollegen in der Wissenschaft, die mir mit der Überprüfung der wissenschaftlichen Inhalte einen unschätzbaren Dienst erwiesen: Robert A. Freitas Jr. (Nanotechnik, Kosmologie), Ralph Merkle (Nanotechnik), Martine Rothblatt (Biotechnik, technologische Beschleunigung), Terry Grossman (Gesundheit, Medizin, Biotechnik), Tomaso Poggio (Gehirnforschung und Reverse Engineering des Gehirns), John Parmentola (Physik, Militärtechnik), Dean Kamen (technische Entwicklung), Neil Gershenfeld (Rechnertechnik, Physik, Quantenmechanik), Joel Gershenfeld (System Engineering), Hans Moravec (künstliche Intelligenz, Robotik), Max More (technologische Beschleunigung, Philosophie), Jean-Jacques E. Slotine (Neuro- und Kognitionswissenschaft), Sherry Turkle (soziale Auswirkungen der Technik), Seth Shostak (SETI, Kosmologie, Astronomie), Damien Broderick (technologische Beschleunigung, die Singularität) und Harry George (Technik-Unternehmertum).

Meinen fähigen internen Lesern: Amara Angelica, Sarah Black, Kathryn Myronuk, Nanda Barker-Hook, Emily Brown, Celia Black-Brooks, Aaron Kleiner, Ken Linde, John Chalupa und Paul Albrecht.

Meinen externen Lesern, die kühne Vorschläge einbrachten: mein Sohn Ethan Kurzweil und David Dalrymple.

Bill Gates, Eric Drexler und Marvin Minsky, für die Erlaubnis, ihre Dialoge in das Buch aufzunehmen, und für ihre Ideen, die sich aus diesen Dialogen ergaben.

Den vielen Forschern und Denkern, deren Ideen und Bemühung zur exponentiellen Vergrößerung des menschlichen Wissensschatzes beitragen.

Die obengenannten Personen lieferten viele Ideen, und dank ihren Bemühungen konnte ich zahlreiche Korrekturen vornehmen. Für alle

verbleibenden Fehler übernehme ich die alleinige Verantwortung.

Menschheit 2.0

PROLOG

Die Macht der Ideen

Ich glaube kein Menschenherz schlägt je höher als das eines Erfinders, wenn eine seiner geistigen Schöpfungen reale Gestalt annimmt.

Nikola Tesla, 1896, Erfinder des Wechselstroms

Als ich fünf war, beschloss ich, Erfinder zu werden. Ich dachte, Erfindungen können die Welt verändern. Andere Kinder fragten sich, was wohl aus ihnen werden würde; ich aber wusste es schon. Die Mondrakete, die ich baute (lange bevor die NASA sich dieser Herausforderung stellte), funktionierte leider nicht. So etwa im Alter von acht erfand ich aber schon realistischere Dinge, zum Beispiel ein durch Eisenstangen bewegtes „Robotertheater“ und ein virtuelles Baseballspiel.

Meine Eltern, beide Künstler, waren Holocaustflüchtlinge. Meine religiöse Erziehung sollte weltoffen und nicht zu provinziell sein.¹ Darum fand meine spirituelle Unterweisung in einer Unitarierkirche statt. Wir beschäftigten uns sechs Monate mit einer bestimmten Religion – besuchten Messen, lasen die Schriften, sprachen mit ihren Führern – und gingen dann zur nächsten Religion über. Das Motto war: „Viele Wege führen zur Wahrheit“. Ich entdeckte natürlich zahlreiche Parallelen zwischen den Religionen der Welt, aber auch ihre Widersprüche waren aufschlussreich. Die Grundgedanken der Religionen, so stellte ich fest, sind stark genug um alle scheinbaren Gegensätze zu versöhnen.

Mit acht entdeckte ich die Tom-Swift-Jr.-Buchreihe. Die dreiunddreißig Bände (von denen erst neun veröffentlicht waren, als ich sie 1956 zu lesen begann) haben alle dasselbe Schema: Tom gerät in eine prekäre Situation, in der sein Schicksal und das seiner Freunde – wenn nicht gar der gesamten Menschheit – auf Messers Schneide steht. Er zieht sich dann in sein Kellerlabor zurück um eine Lösung auszuhecken. Die spannende Frage in

jedem dieser Bücher war, mit welchem genialen Einfall Tom und seine Freunde wohl den Tag retten würden.² Diese Geschichten hatten eine einfache Moral: Jedes scheinbar unüberwindbare Hindernis kann durch die richtige Idee überwunden werden.

Das ist zu meiner persönlichen Philosophie geworden: Egal wie groß der Schlamassel, in dem wir stecken – seien es berufliche, gesundheitliche oder Beziehungsprobleme, seien es die großen wissenschaftlichen, sozialen und kulturellen Herausforderungen unserer Zeit –, es gibt immer eine rettende Idee und wir können darauf kommen. Und dann müssen wir sie umsetzen. Dieser Imperativ hat mein Leben geprägt. Die Macht der Ideen – auch das ist eine Idee.

Ich erinnere mich, wie mein Großvater, ungefähr in der Zeit, als ich die Tom-Swift-Jr.-Reihe las, von einem Besuch in Europa zurückkehrte. Er brachte von dieser Reise zwei Eindrücke mit: zum einen das Wohlwollen, mit dem ihm die Deutschen und Österreicher begegnet waren – dieselben Landsleute, vor denen er 1938 fliehen musste. Zum anderen hatte er das seltene Glück gehabt, Originalmanuskripte Leonardo da Vincis mit eigenen Händen zu befühlen. Diese beiden Berichte haben mich beeinflusst. Insbesondere an den zweiten habe ich oft zurückgedacht. Mein Großvater beschrieb das Erlebnis mit einer Ehrfurcht, als hätte er das Werk Gottes berührt. Letztendlich war das die Religion, in der ich aufwuchs: Verehrung der menschlichen Kreativität und der Macht der Ideen.

In den 1960ern entdeckte ich den Computer und war fasziniert von der Möglichkeit, damit die Welt zu modellieren und neu zu erschaffen. Ich durchstöberte die (bis heute existierenden!) Restposten-Elektroläden auf der Canal Street in Manhattan und suchte nach Teilen für einen eigenen Rechner. Wie alle anderen war ich von der musikalischen, kulturellen und politischen Bewegung der 60er in Bann genommen, aber mindestens genauso begeisterte mich eine sehr viel obscurere Entwicklung, und zwar die von IBM in diesen Jahren vertriebenen Maschinenreihen – von der wuchtigen „7000er“ Serie (7070, 7074, 7090, 7094) bis zum Modell 1620, dem ersten „Minicomputer“. Die Geräte kamen in jährlichen Abständen auf den Markt, eines günstiger und besser als das andere – heute ein bekanntes

Phänomen. Ich kam in Besitz eines IBM 1620 und begann damit statistische Analyseprogramme zu schreiben und später auch Musik zu komponieren.

Ich erinnere mich genau, wie ich 1968 die streng gesicherte, höhlenartige Kammer des mächtigsten Computers von New England betrat. Es handelte sich um das IBM Topmodell 360/91 mit einer höchst sensationellen Million Bytes (ein Megabyte) „Kernspeicher“, ebenso vielen Rechenschritten pro Sekunde (ein Megahertz) und einer stündlichen Mietgebühr von eintausend Dollar. Ich hatte ein Programm geschrieben um High-School-Schüler an Colleges zuzuweisen und betrachtete begeistert den Tanz der Lämpchen auf den Verschaltungen, während die Maschine die einzelnen Anträge abarbeitete.³ Obwohl ich jede einzelne Programmzeile in- und auswendig kannte, kam es mir vor, als würde sich der Computer über irgendwas den Kopf zerbrechen, wenn sich die Lämpchen nach jedem Rechenzyklus für einige Momente verdunkelten. Wie dem auch sei, er schaffte in zehn Sekunden das, wofür wir zehn Stunden gebraucht hätten – und im Gegensatz zu uns machte er keine Fehler.

Als Erfinder in den 1970ern wurde mir klar, dass meine Erfindungen den technischen Möglichkeiten und Marktverhältnissen zum Zeitpunkt ihrer Einführung entsprechen mussten – und nicht zum Zeitpunkt der Planung. Darum untersuchte ich, wie sich verschiedene Felder – unter anderem Elektro-, Kommunikations-, Prozessor- und Speichertechnik – entwickelten und wie diese Entwicklungen den Markt aufmischten und letztendlich unsere Gesellschaft veränderten. Ich kam zu dem Ergebnis, dass die meisten Erfindungen nicht an technischen Problemen, sondern am Timing scheiterten. Erfinden ist ein bisschen wie Surfen: Man muss das Entstehen der Welle vorhersehen und genau im richtigen Moment aufspringen.

Meine Beschäftigung mit technologischen Entwicklungskurven wurde in den 1980ern zum Selbstläufer. Ich begann anhand meiner Modelle die Technik der Zukunft vorauszusagen, Innovationen bis zum Jahr 2000, 2010, 2020 und so weiter. Dadurch gelang es mir, bei meinen eigenen Erfindungen den zukünftigen Stand der Technik einzuplanen. Mitte bis Ende der 1980er schrieb ich dann mein erstes Buch, *The Age of Intelligent Machines*.⁴ Darin fanden sich umfassende (und weitgehend zutreffende) Vorhersagen für die 1990er und 2000er Jahre. Das Buch endete mit dem

Schreckgespenst von Maschinen, die von ihren menschlichen Erbauern nicht mehr zu unterscheiden sind. Das hielt ich für einen guten Schluss, und außerdem erschien es mir problematisch, noch weiter vorauszudenken.

Über die letzten zwanzig Jahre wurde ich vertraut mit der wichtigen Metaidee, dass die Macht der Ideen, die Welt zu verändern, immer größer wird. Die meisten Leute würden dieser Beobachtung wohl zustimmen, aber den wenigsten sind ihre tiefgreifenden Konsequenzen bewusst. Denn in den nächsten Jahrzehnten werden wir die Gelegenheit haben, mithilfe der Macht von Ideen einige unserer ältesten Probleme zu lösen – und dabei ein paar neue Probleme zu schaffen.

In den 1990er Jahren sammelte ich empirische Daten über die offensichtliche Beschleunigung aller Informationstechniken und arbeitete an mathematischen Modellen für diese Entwicklungen. Mit dem „Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs“ entwickelte ich eine Theorie, die erklärt, warum technische Entwicklungen und (Evolutionsprozesse allgemein) exponentiell verlaufen.⁵ 1998 versuchte ich in einem neuen Buch (*The Age of Spiritual Machines*) zu beschreiben, wie das menschliche Leben aussieht, wenn die Grenzen zwischen menschlicher und maschineller Kognition verschwimmen. Dabei stellte ich mir diese Epoche als eine Zeit des Zusammenwirkens unserer biologischen Vergangenheit mit einer überbiologischen Zukunft vor.

Seit der Veröffentlichung von *The Age of Spiritual Machines* habe ich viel über die Zukunft unserer Zivilisation und ihre Rolle im Universum nachgedacht. Es erscheint natürlich schwierig, über die Möglichkeiten einer zukünftigen Zivilisation nachzudenken, die uns intellektuell weit überlegen ist. Aber unser Vermögen in Modellen zu denken befähigt uns durchaus zu sinnvollen Aussagen über die bevorstehende Verschmelzung des biologischen Denkens mit der nichtbiologischen Intelligenz, die wir erschaffen werden. Hiervon handelt dieses Buch. Es gründet auf der Idee, dass wir fähig sind, unser eigenes Denken zu verstehen – sozusagen unseren eigenen Quelltext zu lesen – um es dann zu verbessern und auszubauen.

Manche Kritiker bezweifeln, dass wir imstande sind, unser eigenes Denken mithilfe dieses Denkens zu verstehen. KI-Forscher Douglas

Hofstadter sinniert: „Es könnte einfach sein, dass unsere Gehirne zufälligerweise zu schwach sind, um sich selbst zu verstehen. Denken Sie an Giraffen, deren Gehirn weit davon entfernt ist, sich selbst zu verstehen, dem menschlichen Gehirn aber erstaunlich ähnlich ist.“⁶ Wir haben es jedoch bereits geschafft, Teile des Gehirns nachzumodellieren – einzelne Nervenzellen sowie ganze Neuronenverbände –, und die Modelle werden immer komplexer. Unser Erfolg beim *Reverse Engineering* unseres Gehirns (ein wichtiger Abschnitt dieses Buches) zeigt, dass wir durchaus fähig sind, unser Denken zu verstehen, zu modellieren und zu erweitern. Darin besteht eines der Merkmale, die unsere Spezies einzigartig machen: Unsere Intelligenz hat eine kritische Schwelle überschritten, wodurch wir in der Lage sind, unsere eigenen kreativen Fähigkeiten grenzenlos zu erweitern – und wir haben Greifwerkzeuge (mit Daumen bestückte Hände) um die Welt nach unserem Willen zu formen.

Noch ein Wort zur Magie: Als ich die Tom-Swift-Jr.-Bücher las, war ich auch ein begeisterter Zauberer. Ich erfreute mich am Vergnügen meiner Zuschauer über meine scheinbar unmöglichen Verbiegungen der Realität. Zu meinen Teenager-Zeiten traten technische Projekte an Stelle des Zauberkastens. Ich entdeckte, dass Technik, im Gegensatz zu Zaubertricks, den übernatürlichen Anschein nicht verliert, wenn man ihr Geheimnis lüftet. Hier muss ich an das dritte Clark'sche Gesetz denken: „Hinreichend fortschrittliche Technik ist von Magie nicht zu unterscheiden“.

Man kann auch die Geschichten von Harry Potter in diesem Licht betrachten: Sie mögen frei erfunden sein, aber sie sind keine unrealistische Vision der Welt, wie sie in ein paar Jahrzehnten sein wird. Praktisch all die Harry-Potter-Magie wird technisch möglich werden; in diesem Buch werden wir sehen wie. Quidditch Spielen und das Verwandeln von Menschen und Gegenständen wird möglich sein: in perfekten virtuellen Realitäten und – dank Nanotechnik – auch in der realen Wirklichkeit. Etwas heikler ist die Zeitumkehr (wie in *Harry Potter und der Gefangene von Azkaban*), wobei es selbst hierzu ernsthafte Überlegungen gibt (die kausale Paradoxien vermeiden) – zumindest für einzelne Informationsbits, aus denen wir letzten Endes bestehen. (Siehe die Diskussion in **Kapitel 3** über die Grenzen der Berechnung).

Harry entfesselt seine magischen Kräfte durch Anwendung der richtigen Zaubersprüche. Das Finden und Anwenden solcher Beschwörungsformeln ist natürlich keine einfache Angelegenheit. Die Wortfolge, die Betonung und der ganze Ablauf müssen bis ins Detail stimmen. Genau das gleiche gilt auch für moderne Technik: Unsere Zaubersprüche sind die mathematischen Formeln und Algorithmen, welche die Magie des modernen Alltags möglich machen. Nur wenn die Codesequenz genau stimmt, können Computer Bücher vorlesen, menschliche Sprache verstehen, Herzinfälle vorhersehen (und verhindern) oder die Entwicklung von Aktienkursen voraussagen. Wenn das Beschwörungsritual nur ein klein wenig falsch ist, gerät die Magie viel schwächer oder bleibt ganz aus.

Gegen diesen Vergleich könnte man einwenden, dass die Hogwarts'schen Zauberformeln kurz und knapp sind und nicht mit so vielen Informationen beladen, wie etwa ein modernes Software-Programm. Aber die wesentlichen Kernstücke moderner Technik sind ebenso prägnant. Die Hauptfunktionen moderner Computerprogramme, beispielsweise für Spracherkennung, umfassen nur ein paar Seiten Code. Nicht selten besteht ein großer Fortschritt in einer minimalen Anpassung einer einzigen Formel.

Das gilt auch für die „Erfindungen“ der biologischen Evolution. Der genetische Informationsunterschied zwischen Schimpansen und Menschen besteht lediglich in ein paar Hunderttausend Bytes. Obwohl Schimpansen nur über grundlegende intellektuelle Fähigkeiten verfügen, genügt uns eine kleine genetische Veränderung, um die magischen Wunder der Technik zu erschaffen.

Muriel Rukeyser schreibt: „Das Universum besteht aus Geschichten, nicht aus Atomen“. In **Kapitel 7** bezeichne ich mich als „*Patternist*“, als jemanden also, der Muster als die Grundlage der Realität betrachtet. Die Teilchen, aus denen mein Körper und Gehirn bestehen, werden innerhalb von Wochen ausgetauscht, was bleibt ist das Muster, das sie bilden. Dahingehend kann man auch Muriel Rukeyser interpretieren, wenn man Geschichten als bedeutungsvolle Informationsmuster betrachtet. In diesem Sinne ist dieses Buch also die Geschichte vom Schicksal der Mensch-Maschinen-Zivilisation – ein Schicksal, das wir als Singularität bezeichnen.

KAPITEL 1

Die sechs Epochen

Jeder hält die Grenzen des eigenen Gesichtsfelds für die Grenzen der Welt.

ARTHUR SCHOPENHAUER

Die Singularität naht – ich kann nicht genau sagen, wann mir das klar wurde. Die Erkenntnis kam schrittweise. Fast ein halbes Jahrhundert habe ich mich eingehend mit Computertechnik* und Ähnlichem beschäftigt, und dabei versucht, Sinn und Zweck all der turbulenten Entwicklungen zu verstehen, die es auf so vielen Ebenen zu bestaunen gab. Allmählich dämmerte mir, dass sich ein großer Umbruch in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts anbahnt. Die Gestalt von Energie und Materie wird bis zur Unkenntlichkeit verändert, wenn sie sich dem Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs annähern. In gleicher Weise wird die bevorstehende Singularität, auf die wir uns zubewegen, alle Bestandteile und Umstände des menschlichen Lebens verändern, von der Sexualität bis hin zum Geistigen.

Worin besteht also diese Singularität? Es handelt sich um einen zukünftigen Zeitabschnitt, in dem der technische Fortschritt so schnell und seine Auswirkungen so tief greifend sein werden, dass das menschliche Leben einen unwiderruflichen Wandel erfährt. Das ist weder utopisch noch dystopisch gemeint, aber diese Epoche wird viele, für unseren Lebensinhalt grundlegende Konzepte und Vorstellungen umkrempeln – von Geschäftsmodellen bis zum menschlichen Lebenskreislauf, einschließlich des Todesbegriffs. Das Begreifen der Singularität wird unsere Anschauung der Vergangenheit und der Zukunft verändern. Wer wirklich verstanden hat, was uns da bevorsteht, sieht das Leben an sich und sein eigenes Leben fortan mit anderen Augen. Ein „Singularitarist“¹ ist für mich eine solche

Person: Jemand, der die Singularität verstanden und über ihre Auswirkungen auf sein bzw. ihr eigenes Leben nachgedacht hat.

Ich verstehe nur zu gut, warum viele Leute die offensichtlichen Folgen dessen, was ich als Gesetz der Selbstbeschleunigung (inhärente Beschleunigung der Evolutionsrate, wobei die technische Evolution Fortsetzung der biologischen ist) bezeichnet habe, nicht wahrhaben wollen. Schließlich habe ich selbst vierzig Jahre gebraucht, um zu begreifen, was sich direkt vor meiner Nase abspielt – und ich kann mich immer noch nicht so recht damit anfreunden.

Der baldige Eintritt der Singularität folgt aus der Tatsache, dass sich der Fortschritt menschengemachter Technik beschleunigt, wobei ihre Leistungsfähigkeit exponentiell zunimmt – und exponentielles Wachstum ist ein Wolf im Schafspelz! Es beginnt kaum wahrnehmbar und explodiert dann mit unerwarteter Heftigkeit – unerwartet, falls man nicht genau hinsieht. (Siehe das Diagramm „Lineares vs. exponentielles Wachstum“ auf [Seite 11](#)).

Dazu eine kleine Geschichte: Der Besitzer eines Teiches sorgt sich um seine Fische und möchte sichergehen, dass der Teich nicht mit Seerosenblättern zuwächst, deren Anzahl sich angeblich alle paar Tage verdoppelt. Monat für Monat harrt er geduldig aus, doch auf dem Wasser sind stets nur kleine Seerosenflecken zu sehen, die nicht merklich zu wachsen scheinen. Da die Blätter weniger als ein Prozent der Wasseroberfläche bedecken, macht sich der Mann keine weiteren Sorgen und fährt mit seiner Familie in die Ferien. Als er nach wenigen Wochen wiederkehrt, muss er bestürzt feststellen, dass die Seerosen den Teich vollständig überwuchert haben und all seine Fische dahin sind. Alle paar Tage fand eine Verdopplung statt, und die letzten sieben Verdopplungen reichten aus, um die Abdeckung von einem Prozent auf den ganzen See auszudehnen (sieben Verdopplungen entsprechen einer 128-fachen Vergrößerung). Das ist die verhängnisvolle Natur exponentiellen Wachstums.

Denken Sie an Gary Kasparov, der noch 1992 das jämmerliche Niveau damaliger Schachcomputer verhöhnte. Doch infolge der erbarmungslosen jährlichen Verdopplung der Rechenleistung² gelang es bereits fünf Jahre

später einem Computer, den Großmeister zu schlagen. Die Liste von Disziplinen, in denen Computer die menschlichen Fähigkeiten übertreffen, wächst schnell. Insbesondere das ehemals kleine Anwendungsgebiet von Computerintelligenz erweitert sich um eine Tätigkeit nach der anderen. Computer diagnostizieren beispielsweise Elektrokardiogramme und medizinische Aufnahmen. Sie steuern und landen Flugzeuge, treffen taktische Entscheidungen für automatische Waffensysteme, nehmen Kredite auf, treffen finanzielle Entscheidungen, und sind für viele andere Aufgaben verantwortlich, für die ehemals menschliche Intelligenz unentbehrlich war. Die Leistungsfähigkeit solcher Systeme basiert zunehmend auf der Kombination verschiedener Arten künstlicher Intelligenz (KI). Aber solange es noch Bereiche gibt, in denen die KI versagt, werden Skeptiker diese Bereiche zur unüberwindlichen Bastion der menschlichen Überlegenheit über die Fähigkeiten ihrer eigenen Schöpfungen erklären.

In diesem Buch will ich jedoch zeigen, dass innerhalb weniger Jahrzehnte die Informationstechnik alles menschliche Wissen und Können erfasst, und letztendlich die Mustererkennungs- und Problemlösungsfähigkeiten sowie die emotionale und moralische Intelligenz des menschlichen Gehirns selbst erlangt haben wird.

Dem Gehirn, obschon in vielerlei Hinsicht beeindruckend, sind klare Grenzen gesetzt. Wir nutzen seine enorme Parallelität (einhundert Milliarden neuronale Verbindungen, die gleichzeitig arbeiten) um filigrane Muster schnell zu erkennen. Dennoch denken wir extrem langsam: Die elementaren neuronalen Operationen sind mehrere Millionen Mal langsamer als aktuelle elektrische Schaltkreise. Damit ist unsere physiologische Bandbreite zur Verarbeitung neuer Informationen äußerst beschränkt, zumindest angesichts des exponentiellen Wachstums des gesamten menschlichen Wissens.

Ebenso ist auch unser biologischer Körper in seiner derzeitigen Version gebrechlich und fehleranfällig, ganz zu schweigen von den mühsamen Instandhaltungsroutinen, die er erfordert. Und obwohl sich die menschliche Intelligenz gelegentlich zu kreativen Höhenflügen aufschwingt, so ist doch das meiste menschliche Denken wenig originell, sondern belanglos und begrenzt.

Mit der Singularität werden wir die Grenzen unserer biologischen Körper und Gehirne überschreiten. Wir werden die Gewalt über unser Schicksal erlangen. Unsere Sterblichkeit wird in unseren Händen liegen. Wir werden so lange leben können wie wir wollen (was nicht unbedingt heißt, dass wir ewig leben werden). Wir werden das menschliche Denken vollständig verstehen, erweitern und an neue Ufer führen. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird die nichtbiologische Komponente unserer Intelligenz Trillionen Mal mächtiger sein als bloße menschliche Intelligenz.

Wir befinden uns in der frühen Übergangsphase. Der Paradigmenwechsel (die Geschwindigkeit, in der wir grundlegende technische Herangehensweisen verändern) und der exponentielle Kapazitätswachstum der Informationstechnik erreichen allmählich den „Knick der Kurve“, das heißt, der Exponentialtrend beginnt sich abzuzeichnen. Kurz nach diesem Stadium kommt es zur Explosion. Noch vor der Mitte des Jahrhunderts wird sich unsere, vom Menschen selbst nicht mehr unterscheidbare Technik so rasant weiterentwickeln, dass die Wachstumskurve praktisch senkrecht ansteigt. Die – rein mathematisch zwar immer noch endliche – Wachstumsrate wird so extrem ansteigen, dass die Menschheitsgeschichte aus allen Fugen bricht. So wird es zumindest der nicht unterstützten*, biologischen Menschheit erscheinen.

In der Singularität werden unser biologisches Denken und Dasein mit unserer Technik verschmelzen. Das Ergebnis ist eine nach wie vor menschliche Welt, allerdings jenseits unserer biologischen Wurzeln. Danach wird kein Unterschied mehr sein zwischen Mensch und Maschine, oder zwischen physikalischer und virtueller Realität. Falls Sie sich fragen, was dann überhaupt noch einen Menschen ausmacht – nun, es ist einfach folgende Qualität: Unsere Spezies strebt von Natur aus danach, ihre physischen und geistigen Fähigkeiten über alle gegebenen Grenzen hinweg zu erweitern.

Die meisten Kommentare zu diesen Veränderungen beziehen sich auf den vermeintlichen Verlust wesentlicher Aspekte unserer Menschlichkeit. Diese Sichtweise beruht jedoch auf einer falschen Vorstellung von der Zukunft der Technik. Noch keine der bisherigen Maschinen besaß dieselben raffinierten Fähigkeiten, die der biologische Mensch an den Tag legt. Die Singularität

hat vielerlei Konsequenzen, doch die wichtigste ist, dass unsere Technik die Feinheit und Eleganz der höchsten menschlichen Fähigkeiten erreichen und schließlich in den Schatten stellen wird.

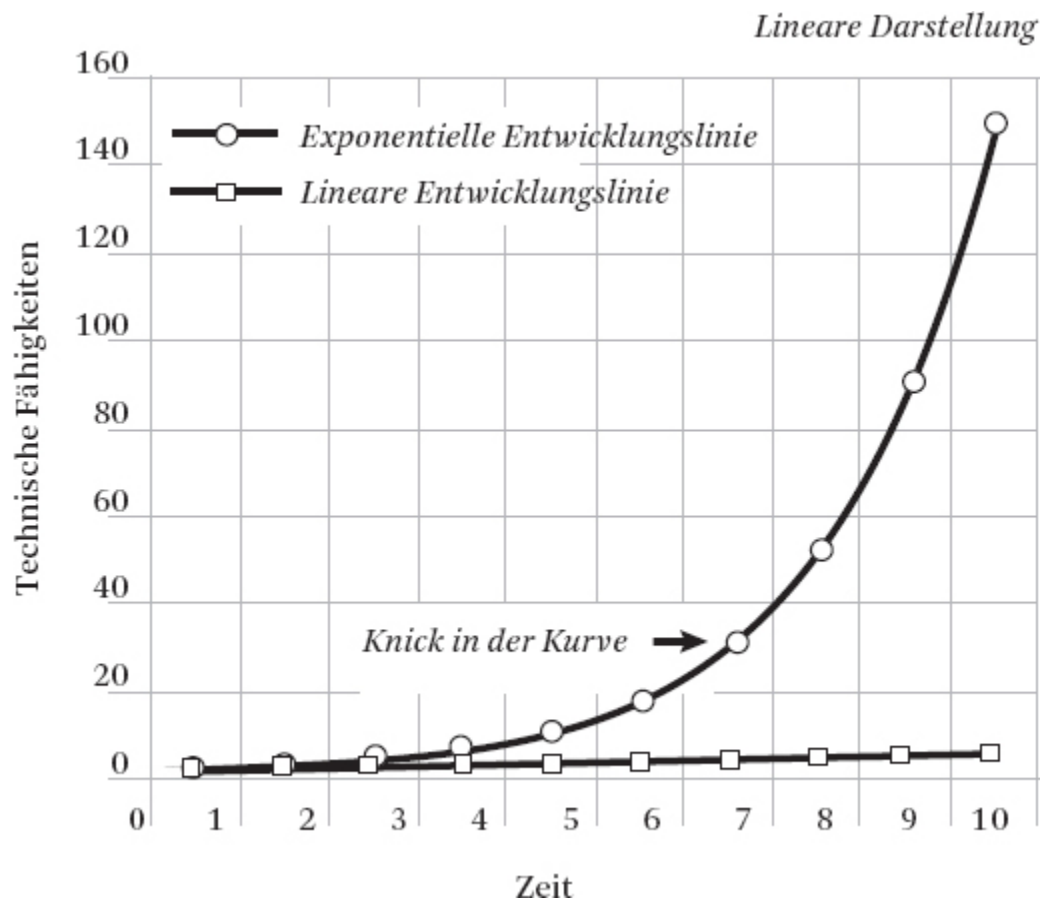
Intuitiv-lineare versus historisch-exponentielle Betrachtung

Wenn die erste übermenschliche Intelligenz, die sich selbst rekursiv zu verbessern beginnt, erschaffen sein wird, dann ist mit einem fundamentalen, nicht annähernd überschaubaren Umbruch zu rechnen.

MICHAEL ANISSIMOV

John von Neumann, der legendäre Pionier der Informatik, sagte in den 1950er Jahren: „Der immerzu beschleunigende technische Fortschritt [...] erregt den Anschein, dass sich die Geschichte unserer Rasse einer entscheidenden Singularität annähert, nach welcher das menschliche Leben, wie wir es kennen, nicht weitergehen kann“.³ Von Neumann macht zwei wichtige Beobachtungen: *Beschleunigung* und *Singularität*. Dahinter steckt erstens der Gedanke, dass der menschliche Fortschritt nicht linear (Wachstum durch wiederholte Addition einer Konstante), sondern exponentiell verläuft (Wachstum durch wiederholtes Multiplizieren mit einer Konstante).

Lineares vs. exponentielles Wachstum:



Linear versus exponentiell: Lineares Wachstum verläuft stetig; exponentielles Wachstum verläuft (ab einem gewissen Zeitpunkt) explosionsartig

Zweitens ist exponentielles Wachstum trügerisch: Es beginnt langsam und unscheinbar, nimmt aber nach der Biegung der Kurve explosionsartig an Fahrt auf. Die Zukunft wird weitgehend falsch gedeutet. In der Vorstellung unserer Vorfahren glich die Zukunft ungefähr der Gegenwart und diese ungefähr der Vergangenheit. Exponentialtrends gab es zwar auch schon vor tausend Jahren, aber in einem dermaßen langsamen, flachen Stadium, dass eigentlich gar nichts zu passieren schien – was die Annahme einer veränderungslosen Zukunft bestätigte. Heute sind wir uns des

kontinuierlichen technischen Fortschritts und seiner sozialen Folgen durchaus bewusst. Trotzdem wird die Zukunft die meisten Leute gewaltig verblüffen, denn die wenigsten sind sich wirklich im Klaren darüber, dass auch die Geschwindigkeit des Fortschritts selbst zusehends zunimmt.

Die meisten Langzeitprognosen für das, was in der kommenden Zeit technisch möglich sein wird, unterschätzen die bevorstehenden Entwicklungen drastisch, weil sie auf einer Geschichtsanschauung beruhen, die ich als „intuitiv-linear“ bezeichne, im Gegensatz zu einer „historisch-exponentiellen“ Betrachtungsweise. Nach meinen Modellen verdoppelt sich die Häufigkeit von Paradigmenwechseln mit jedem Jahrzehnt (mehr dazu im nächsten Kapitel). Der Fortschritt hat sich demnach über das 20. Jahrhundert hinweg bis zum heutigen Tempo gesteigert. Die Errungenschaften dieser Zeit entsprechen also ungefähr denen von zwanzig Jahren Entwicklungszeit im Tempo des Jahres 2000. Bis 2014 entwickeln wir uns um weitere zwanzig Jahre weiter, und dann noch mal innerhalb von nur sieben Jahren. Anders ausgedrückt: Gemessen an der *heutigen* Fortschrittsrate bringt uns das 21. Jahrhundert nicht hundert Jahre Weiterentwicklung, sondern ungefähr zwanzigtausend – etwa tausend Mal mehr, als im 20. Jahrhundert erreicht wurde.⁴

Trugschlüsse über die Zukunft sind häufig und allgegenwärtig. Eines von vielen Beispielen entstammt einer Machbarkeitsdebatte um molekulare Nanotechnik, an der ich teilnahm. Ein beteiligter Nobelpreisträger tat geäußerte Sicherheitsbedenken mit der Behauptung ab, dass „wir in den nächsten hundert Jahren nicht mit selbstreplizierenden Nanorobotern (winzigen, auf molekularer Ebene gefertigten Maschinen) zu rechnen haben“. Ich entgegnete, hundert Jahre seien eine vernünftige Schätzung, und dass ich dieselbe Entwicklungsdauer veranschlagen würde, wenn man *die heutige Fortschrittsrate* zugrunde legt (welche der fünffachen Durchschnittsgeschwindigkeit des 20. Jahrhunderts entspricht). Da sich aber das Tempo jedes Jahrzehnt verdoppelt, erreichen wir das, was einem Jahrhundert Entwicklung *im heutigen Tempo* entspricht, in nur fünfundzwanzig Kalenderjahren.

Ein anderes Beispiel stammt von der *Future-of-Life*-Konferenz der Zeitschrift *Time*, die im Jahre 2003 zum fünfzigjährigen Jubiläum der

Entdeckung der DNS-Struktur stattfand. Alle Redner wurden befragt, wie sie sich die nächsten fünfzig Jahre vorstellen.⁵

Praktisch jeder der Referenten nahm die Entwicklungen der letzten fünfzig Jahre als Richtwert für die nächsten fünfzig. James Watson etwa, Mitentdecker der DNS, meinte, in fünfzig Jahren hätten wir Medikamente, mithilfe derer man so viel essen kann, wie man will, ohne zuzunehmen.

„Fünfzig Jahre?“, entgegnete ich. Bei Mäusen haben wir das doch durch Ausschalten des Insulin-Rezeptor-Gens, das die Fetteinlagerung in Fettzellen kontrolliert, bereits geschafft. Wirkstoffe für Menschen (vermittels RNA-Interferenz und anderen Techniken, siehe **Kapitel 5**) sind in Entwicklung und werden in einigen Jahren in klinischen Studien erprobt. Solche Medikamente sind in fünf bis zehn Jahren verfügbar, nicht in fünfzig. Andere Prognosen waren ähnlich kurzsichtig und spiegelten eher gegenwärtige Forschungsschwerpunkte, als die tief greifenden Neuerungen des nächsten halben Jahrhunderts. Unter allen Denkern dieser Konferenz waren es hauptsächlich Bill Joy und ich, die die exponentielle Tendenz unserer Zukunft berücksichtigten. Allerdings wurden wir uns nicht einig über die Tragweite der kommenden Veränderungen (siehe **Kapitel 8**).

Die meisten Leute nehmen an, dass die Entwicklung im derzeitigen Tempo weiterläuft. Selbst wenn sie über längere Zeit miterleben, wie der Fortschritt immer schneller vonstatten geht, bleibt ihre intuitive Einsicht, dass auch künftig alles sich nur so schnell verändern wird, wie in der jüngsten Vergangenheit. Der Grund dafür ist, mathematisch gesehen, dass Exponentialkurven wie Geraden aussehen, wenn man nur kleine Ausschnitte betrachtet. Darum extrapolieren selbst kluge Köpfe, wenn sie über die Zukunft sprechen, häufig den momentanen Fortschritt auf die nächsten zehn oder hundert Jahre. Und darum nenne ich diese Betrachtungsweise die „intuitiv-lineare“.

Eine ernsthafte Untersuchung der Technikgeschichte ergibt jedoch, dass der technische Fortschritt exponentiell verläuft. Exponentielles Wachstum liegt in der Natur evolutionärer Prozesse

– Technik ist das beste Beispiel. Man kann die Tatsachen drehen und wenden, verschiedene Technologien betrachten, von elektronischen bis hin zu biologischen, und unter verschiedenen Zeitmaßstäben verschiedene

Indikatoren heranziehen – sei es die Menge menschlichen Wissens oder das Wirtschaftsvolumen –, in jedem Fall kann man eine Beschleunigung von Fortschritt und Wachstum beobachten. Tatsächlich stößt man häufig sogar auf „doppelt exponentielles“ Wachstum, das heißt die exponentielle Wachstumsrate (der Exponent) selbst wächst wiederum exponentiell. (Siehe zum Beispiel die Untersuchung von Rechner-Preis-Leistung im nächsten Kapitel).

Viele Wissenschaftler und Ingenieure leiden unter – wie ich es nenne – „Wissenschaftlerpessimismus“. Häufig sind sie so vertieft in die Schwierigkeiten und komplizierten Details eines aktuellen Problems, dass sie den Blick für die langfristige Tragweite ihrer Arbeit und ihres Fachgebiets verlieren. Ebenso wenig bedenken sie die sehr viel mächtigeren Werkzeuge, die ihnen mit jeder neuen Generation von Technik zur Verfügung stehen.

Wissenschaftler sind darauf geeicht, skeptisch zu sein, sich zurückhaltend über Forschungsziele zu äußern und Spekulationen über den wissenschaftlichen Tagesbetrieb hinaus zu vermeiden. Als technologische Generationen länger andauerten als menschliche, mag das angebracht gewesen sein. Es ist aber heute, da eine Technikgeneration wenige Jahre dauert, nicht mehr im Interesse der Gesellschaft.

Erinnern Sie sich nur an die Biochemiker, die 1990 den Plan anzweifeln, das menschliche Genom innerhalb von fünfzehn Jahren zu sequenzieren. Diese Forscher hatten bereits ein volles Jahr gebraucht, um auch nur ein Zehntausendstel des Genoms auszulesen. Es schien ihnen also einleuchtend, dass es, trotz des vernünftigerweise zu erwartenden Fortschritts, ein Jahrhundert oder länger dauern würde, das komplette Genom zu erfassen.

Oder denken Sie daran, dass Mitte der 1980er bezweifelt wurde, dass das Internet, das damals nur aus einigen Zehntausend Knoten (Servern) bestand, ein bedeutsames Phänomen werden würde. Die Anzahl verdoppelte sich damals jedes Jahr, es war also innerhalb von zehn Jahren mit Abermillionen Knotenpunkten zu rechnen. Aber diese Entwicklung blieb unbeachtet von denjenigen, die sich mit der Spitzentechnologie des Jahres 1985

herumschlugen, welche ja zunächst nur einige Tausend Knoten pro Jahr hervorbrachte.⁶

Der umgekehrte Denkfehler tritt auf, wenn bestimmte Exponentialentwicklungen erkannt und jenseits vernünftiger Wachstumsabschätzungen wild überinterpretiert werden. Exponentielles Wachstum setzt nicht unverzüglich ein*, es beschleunigt mit der Zeit. Die Vermögenswertsteigerung (das Steigen der Aktienpreise) während der „Dotcom-Blase“ (1997–2000) überstieg, trotz des realen exponentiellen Wertzuwachses, jede vernünftige Prognose. Wie ich im nächsten Kapitel zeigen werde, verlief der Ausbau von Internet und Onlinehandel gleichmäßig während aller Börsenturbulenzen; die maßlosen Übererwartungen schädeten ausschließlich dem Kapitalmarkt. Wir kennen solche Fehler schon von früheren Paradigmenwechseln, etwa aus der Eisenbahnära, als das Pendant der Dotcom-Blase zu einem ekstatischen Schienenlegen führte.

Ein weiterer typischer Prognosefehler besteht darin, die Auswirkungen einer bestimmten Entwicklung isoliert zu betrachten, als ob sich die restliche Welt nicht verändern würde. Ein gutes Beispiel sind die Befürchtungen, dass eine radikale Steigerung der Lebenserwartung zu Überbevölkerung und Aufbrauch begrenzter, lebenswichtiger Ressourcen führt. Dabei bleibt jedoch die ebenso radikale Neuerschließung von Ressourcen durch Nanofertigung und starke KI außer Acht. So wird es etwa 2020 möglich sein, per Nanotechnik aus günstigen Rohstoffen und Informationen fast jedes physische Produkt herzustellen.

Ich betone hier den Gegensatz von linearer und exponentieller Betrachtung, weil diese Kontroverse das Hauptproblem von Prognosen künftiger Entwicklungen darstellt. Die meisten Technologiepropheten ignorieren die historisch-exponentielle Perspektive völlig. Tatsächlich betrachtet fast jeder, der mir begegnet, die Zukunft linear. Das ist der Grund, warum die Leute überschätzen, was kurzfristig erreicht werden kann (weil sie fehlende Voraussetzungen übersehen), aber unterschätzen, was langfristig möglich ist (weil sie exponentielles Wachstum ignorieren).

Die sechs Epochen

Erst formen wir unsere Werkzeuge, dann formen die Werkzeuge uns.

MARSHALL MCLUHAN

Die Zukunft ist auch nicht mehr das, was sie mal war.

YOGI BERRA

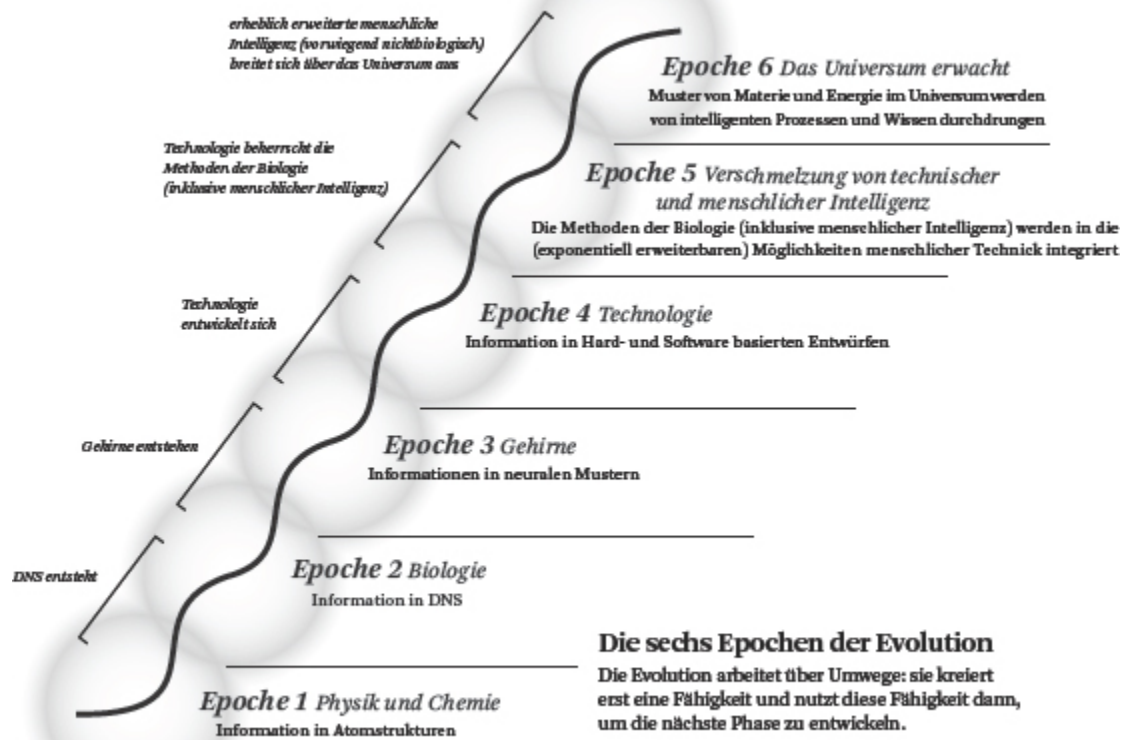
Evolution ist ein Prozess, bei dem Muster von immer höherer Ordnung entstehen. Den Begriff „Ordnung“ werde ich im nächsten Kapitel besprechen; in diesem Abschnitt geht es um Muster. Ich glaube, die Geschichte der Welt ist eine Geschichte der Evolution von Mustern. Evolution funktioniert mittelbar*: jedes Stadium (oder jede Epoche) benutzt die Methoden zur Informationsverarbeitung, die aus dem vorherigen Stadium hervorgehen, um das nächste zu erreichen. Wie wir sehen werden, beginnt die Singularität in Epoche fünf und dehnt sich in Epoche sechs von der Erde auf den Rest des Weltalls aus.

Epoche eins: Physik und Chemie. Wir können unseren Ursprung zurückverfolgen bis auf eine Ebene von Information in Reinform: Muster in Materie und Energie. Jüngste Theorien der Quantengravitation besagen, dass Raum und Zeit aus diskreten Quanten bestehen, aus Informationsbruchstücken. Ob Materie und Energie letztendlich digitaler oder analoger Natur sind, ist unklar, aber unabhängig davon wissen wir, dass atomare Strukturen diskrete Informationen tragen beziehungsweise solche sind.

Ein paar Hunderttausend Jahre nach dem Urknall begannen Atome zu entstehen, Kerne aus Protonen und Neutronen fingen Elektronen in ihren Orbits ein. Aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften wurden die Atome „klebrig“, und einige Millionen Jahre später war die Chemie geboren, als sich Atome zusammenfanden, um relativ stabile Strukturen zu bilden, namentlich Moleküle. Von allen Elementen erwies sich das Kohlenstoffatom am vielseitigsten; es knüpft Verbindungen in vier

Richtungen (die meisten Elemente bilden ein bis drei Verbindungen) und ermöglicht komplizierte, informationsreiche, dreidimensionale Strukturen.

Die Gesetze unseres Universums und die Balance der Naturkonstanten, die das Zusammenwirken der Grundkräfte bestimmen, sind so exquisit, feinsinnig und genau zugeschnitten auf die Kodierung und Evolution von Information (was zu Komplexitätszunahme führt), dass man sich wundert, wie eine so außerordentlich unwahrscheinliche Situation zustande kam. Wo manche eine göttliche Hand im Spiel sehen, sehen andere unsere eigenen Hände – genauer gesagt das sogenannte anthropische Prinzip, welches besagt, dass wir nur in einem Universum, das die Evolution ermöglicht, überhaupt existieren und solche Fragen stellen können.⁷ Neuere physikalische Theorien vermuten, dass regelmäßig neue Universen mit jeweils eigenen, einzigartigen Gesetzen entstehen, meist jedoch schnell wieder verschwinden oder aber fortbestehen, ohne interessante Muster (wie die irdische Biologie) hervorzubringen, weil ihre Gesetze nicht die Evolution von immer komplexeren Erscheinungen ermöglichen.⁸ Es ist schwer vorstellbar, wie solche Theorien über den frühen Kosmos zu überprüfen sind, aber es steht fest, dass die physikalischen Gesetze unseres Universums genau die richtigen Voraussetzungen darstellen, um eine Evolution, hin zu immer höherer Ordnung und Komplexität, zu ermöglichen.⁹



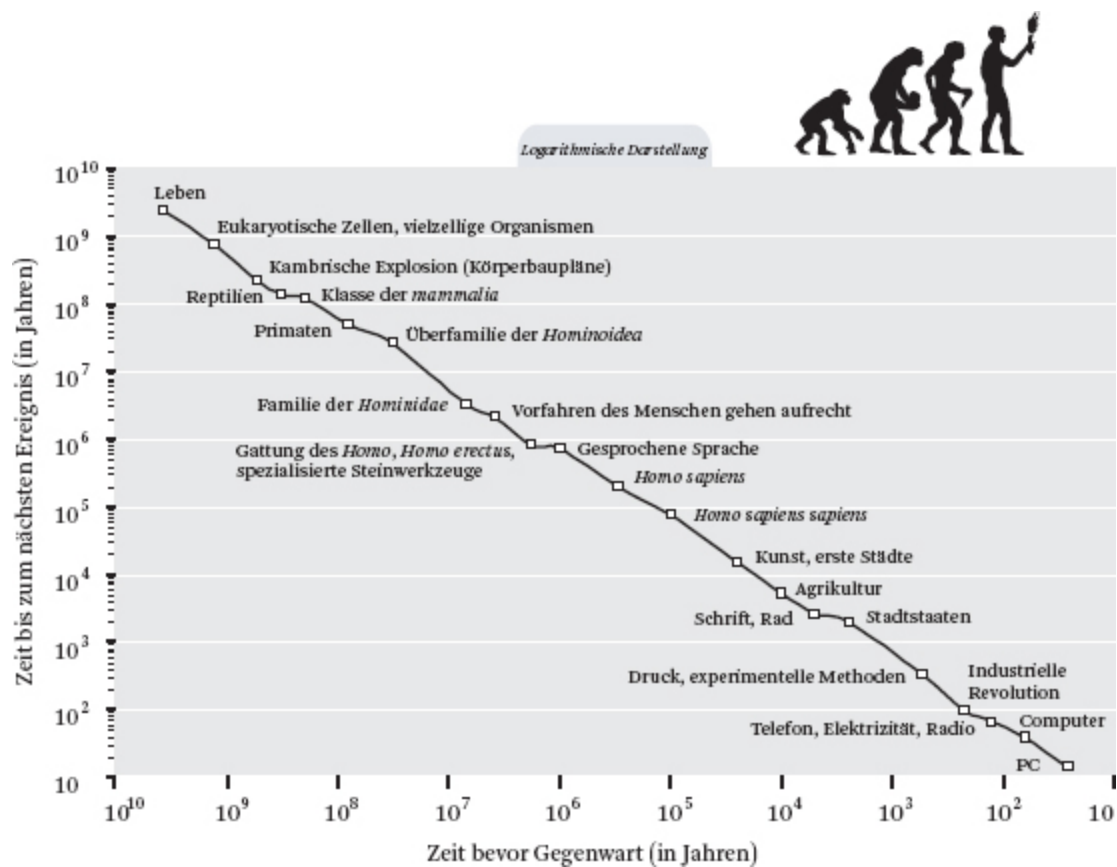
Epoche zwei: Biologie und DNS. Während der zweiten Epoche, vor einigen Milliarden Jahren, bildeten sich immer komplexere Kohlenstoffverbindungen, bis schließlich ein Molekülklumpen entstand, der über einen Mechanismus verfügte, um sich selbst zu kopieren – der Ursprung des Lebens. Schließlich entwickelten biologische Systeme ein präzises Speichermedium (die DNS) für Baupläne großer Molekülkonstrukte. Diese Konstrukte, mit ihrer Maschinerie von Kodons und Ribosomen, ermöglichten eine exakte Buchführung über die evolutionären Experimente der zweiten Epoche.

Epoche drei: Gehirne. Jede Epoche hebt die Informationsevolution auf eine höhere Vermittlungsstufe. (Das heißt, die Evolution benutzt die Ergebnisse der vergangenen Epoche um die nächste zu eröffnen). So brachte beispielsweise in der dritten Epoche eine DNS-basierte Evolution Organismen hervor, die über Sinnesorgane Informationen erfassten, um diese in ihren Gehirnen und Nervensystemen zu verarbeiten und zu

speichern. Die Mechanismen der zweiten Epoche (DNS-Protein-Baupläne, epigenetische Informationen und RNS-Fragmente zur Kontrolle der Genexpression) dienten als Mittel (daher „Vermittlungsstufe“) zur Entwicklung der Datenverarbeitungsmechanismen der dritten Epoche (Gehirne und Nervensysteme). Die dritte Epoche begann mit der Fähigkeit der ersten Tiere, Muster zu erkennen, was bis heute die Hauptbeschäftigung unseres Gehirns ist.¹⁰ Zu guter Letzt entwickelte unsere Spezies die Fähigkeit, abstrakte geistige Modelle der Erfahrungswelt zu konzipieren und rational darüber nachzudenken. Wir besitzen die Fähigkeit, die Welt in Gedanken neu zu entwerfen und diese Ideen in die Tat umzusetzen.

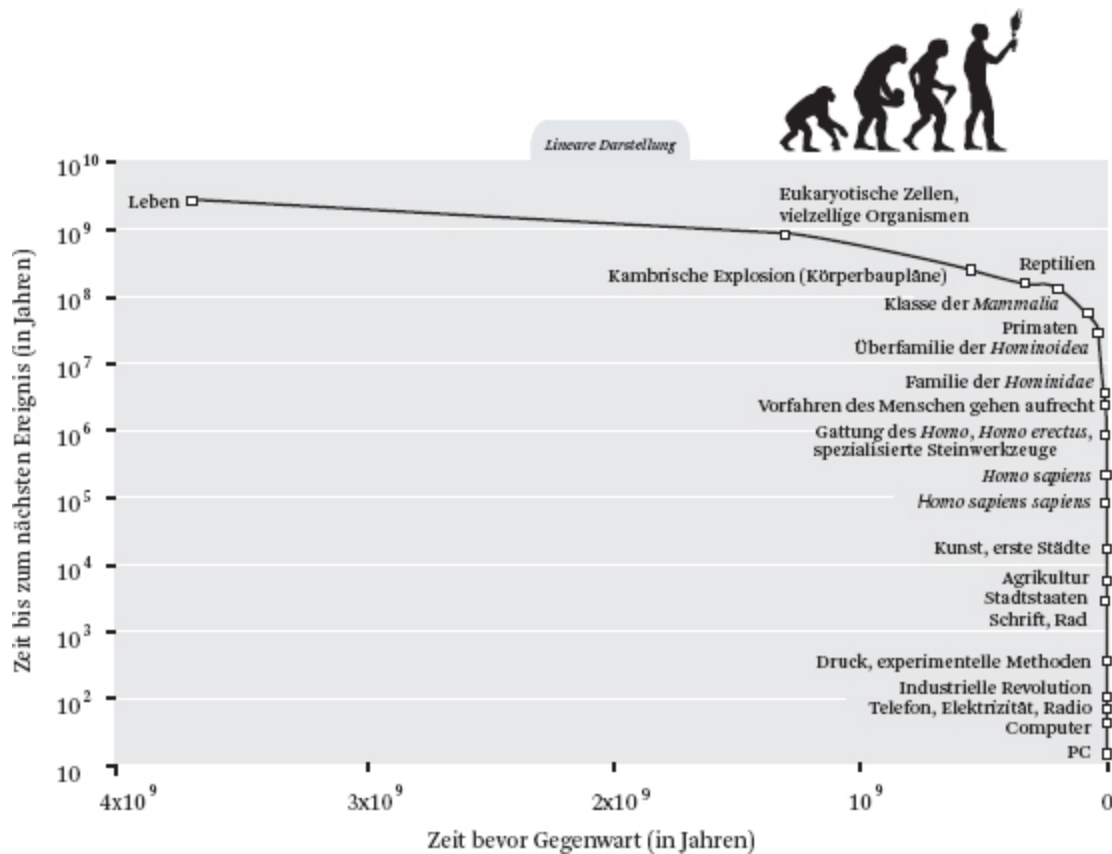
Epoche vier: Technik. Rationales und abstraktes Denken, in Kombination mit unseren geschickten Greifhänden, führte die Menschheit in die vierte Epoche und die nächste Vermittlungsstufe: die Evolution menschengemachter Technik. Diese entwickelte sich von einfachen Mechanismen hin zu aufwendigen Automaten (selbstständig funktionierende Maschinen), bis schließlich die Technik selbst, in Form von ausgefeilten Rechen- und Kommunikationsgeräten, fähig wurde, Informationsmuster wahrzunehmen, zu speichern und auszuwerten. Zum Vergleich der Evolutionsgeschwindigkeit biologischer Intelligenz mit dem technischen Fortschritt sei gesagt, dass das Gehirnvolumen höherer Säugetiere etwa alle hunderttausend Jahre um anderthalb Kubikzentimeter zulegte, während sich die Computerrechenleistung ungefähr alle zwei Jahre verdoppelt (siehe nächstes Kapitel). Natürlich lässt sich Intelligenz weder in Gehirnvolumen noch in Rechenleistung messen, es sind aber allemal wichtige Voraussetzungen. Wenn wir wichtige Meilensteine der biologischen wie technischen Entwicklung zusammen in ein Diagramm zeichnen und sowohl für die x -Achse (Jahre bis zum heutigen Tag) als auch für die y -Achse (Dauer zwischen Paradigmenwechseln) einen logarithmischen Maßstab verwenden, so erhalten wir eine relativ gerade Linie (was einer kontinuierlichen Beschleunigung entspricht) und sehen, dass die biologische Evolution nahtlos in die Entwicklung durch Menschenhand übergeht.¹¹

Countdown zur Singularität



Countdown zur Singularität: Biologische Evolution und menschliche Technologie weisen beide eine kontinuierliche Beschleunigung auf, angezeigt durch die kürzer werdenden Zeiträume zwischen zwei Ereignissen (zwei Milliarden Jahre zwischen dem Ursprung des Lebens und Zellen; vierzehn Jahre zwischen dem PC und dem WWW).

Countdown zur Singularität

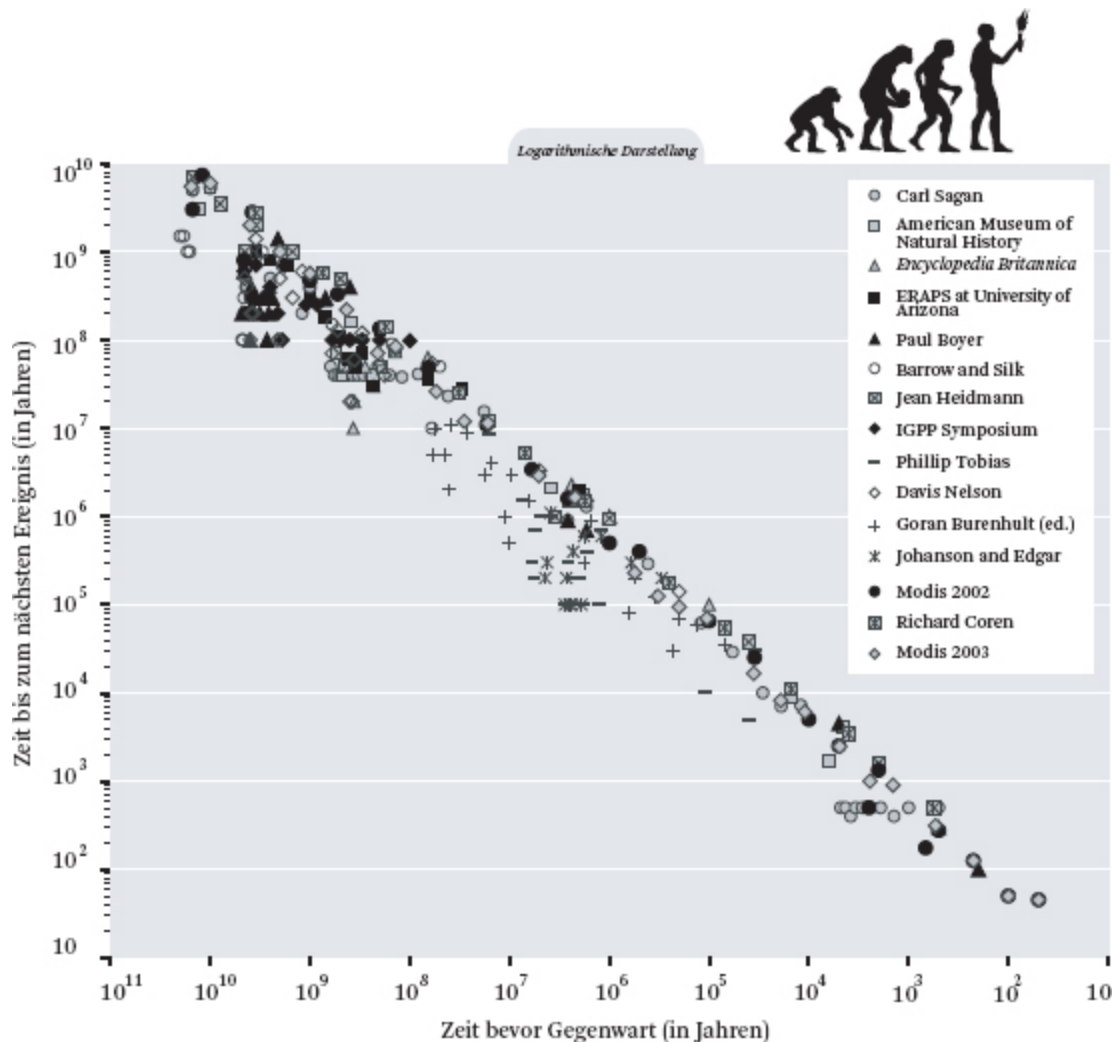


Lineare Ansicht der Evoluton: Diese Version der vorangehenden Darstellung nutzt dieselben Daten, die „Zeit bevor Gegenwart“ wird jedoch auf einer linearen anstelle einer logarithmischen Skala abgebildet. Dadurch fällt zwar die Beschleunigung dramatischer aus, aber Details sind nicht zu erkennen. Aus einer linearen Perspektive haben sich die meisten Schlüsselereignisse eben erst „vor kurzem“ ereignet.

Die obenstehenden Diagramme entsprechen meiner Auffassung von Schlüsselereignissen der biologischen und technologischen Vergangenheit. Der Linienverlauf beruht jedoch wohlgermerkt nicht auf meiner eigenen Auswahl solcher Ereignisse. Viele Analysten und Autoren haben Listen wichtiger Entwicklungen der biologischen und technischen Evolution

zusammengestellt, jede davon hat ihre Eigenwilligkeiten. Wenn wir aber solche Listen aus unterschiedlichsten Quellen (unter anderen der *Encyclopaedia Britannica*, des American Museum of Natural History und Carl Sagans „kosmischen Kalender“) kombinieren, sehen wir dieselbe gleichmäßige Beschleunigung. Das folgende Diagramm vereint fünfzehn Auflistungen von Schlüsselereignissen.¹² Da verschiedene Analysten für dieselben Ereignisse verschiedene Zeitpunkte veranschlagen, und verschiedene Listen ähnliche oder sich überschneidende Ereignisse enthalten, sind die Daten „verrauscht“ (beinhalten eine statistische Varianz), was zu einer „Verdickung“ der Verlaufslinie führt. Die allgemeine Tendenz ist jedoch nicht zu übersehen.

Paradigmenwechsel für 15 Listen von Schlüsselereignissen

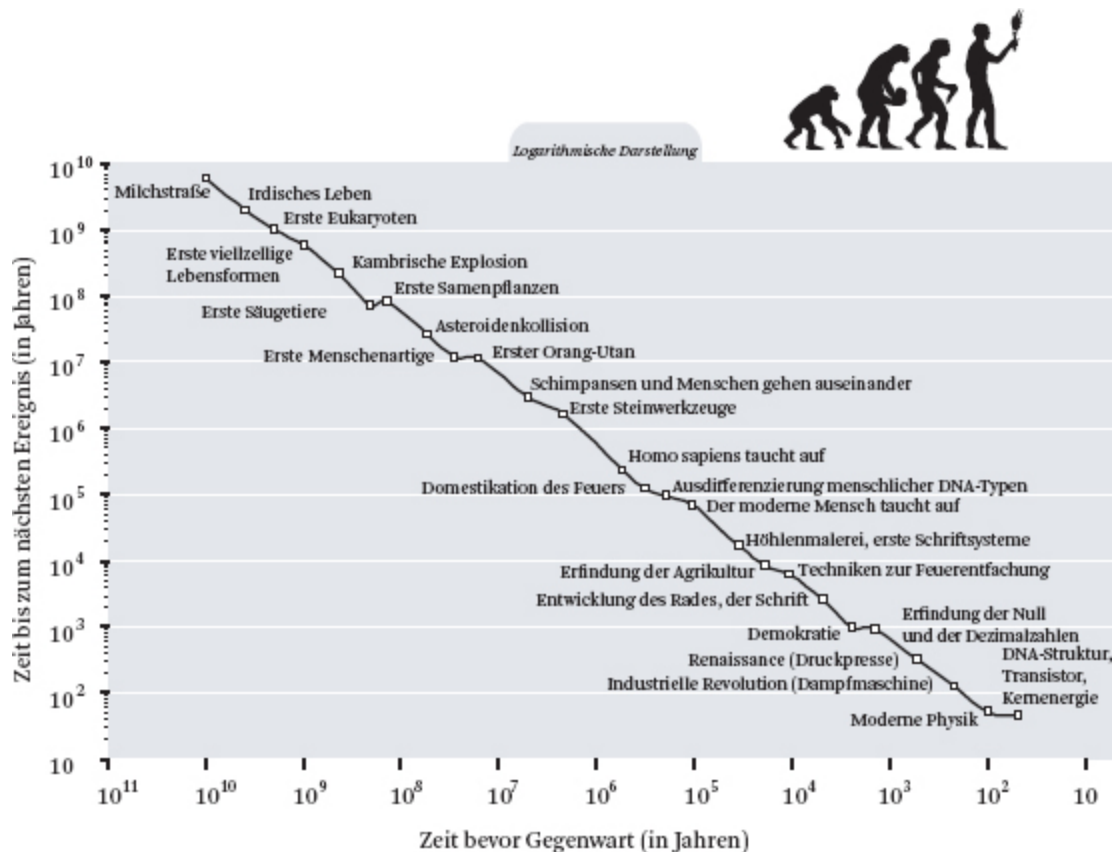


Fünfzehn Ansichten der Evolution: Größere Paradigmenwechsel in der Geschichte der Welt, wie sie in fünfzehn verschiedenen Listen von Schlüsselereignissen aufgeführt werden. Sowohl in der biologischen wie später auch in der technologischen Evolution zeichnet sich ein deutlicher Trend zur gleichmäßigen Beschleunigung ab.

Der Physiker und Komplexitätstheoretiker Theodore Modis analysierte diese Listen und teilte die Ereignisse in achtundzwanzig Gruppen (die er als

kanonische Meilensteine bezeichnet) ein, indem er identische, ähnliche und/oder zusammenhängende Ereignisse gruppierte.¹³ Dadurch wird das Rauschen eliminiert und es offenbart sich wiederum derselbe Verlauf:

Kanonische Meilensteine



Kanonische Meilensteine basierend auf Häufungen von Ereignissen aus dreizehn Listen.

Die Größen, die in diesen Diagrammen exponentiell anwachsen, sind Ordnung und Komplexität – zwei Konzepte, die wir im nächsten Kapitel untersuchen werden. Das entspricht unseren bisherigen Überlegungen: Vor einer Milliarde Jahren passierte über Jahrmillionen hinweg nicht sonderlich viel. Vor einer viertel Million Jahren dagegen fanden im Abstand von nur hunderttausend Jahren epochale Ereignisse statt, wie etwa die Entwicklung

des Menschen. Dasselbe in der Technik: Wenn wir fünfzigtausend Jahre zurückblicken, dann sehen wir fast keine Entwicklung über eine Spanne von tausend Jahren. In der jüngeren Vergangenheit dagegen vergehen nur zehn Jahre von der Entstehung eines neuen Paradigmas, wie dem World Wide Web, bis hin zu seinem massenhaften Einsatz (durch ein Viertel der Bevölkerung von Industrieländern).

Epoche fünf: Verschmelzung menschlicher Technik und Intelligenz. In einigen Jahrzehnten wird mit der fünften Epoche die Singularität einsetzen. Sie ergibt sich aus der Verschmelzung des umfangreichen Wissens in unseren Köpfen mit der überragenden Kapazität, Geschwindigkeit und Vernetzung unserer Technik. Durch die fünfte Epoche kann die Mensch-Maschinen-Zivilisation hinauswachsen über die Beschränkungen des menschlichen Gehirns mit seinen wenigen hundert Billionen lahmen Synapsen.¹⁴

Die Singularität wird viele unserer ältesten Probleme lösen und die menschliche Schaffenskraft ins Unermessliche steigern. Wir werden grundlegende Schranken der biologischen Evolution übersteigen und dabei die Intelligenz, die uns diese Evolution bescherte, bewahren und vermehren. Das letzte Wort ist jedoch noch nicht gesprochen, da die Singularität natürlich auch unserem Selbstzerstörungstrieb völlig neue Möglichkeiten eröffnen wird.

Epoche sechs: Das Universum erwacht. Ich werde dieses Thema in Kapitel 6, unter dem Titel „...für das kosmische Schicksal“, behandeln. Intelligenz an sich, entsprungen dem menschlichen Gehirn sowie den technischen Kreationen des Menschen, wird in den Nachwehen der Singularität beginnen, Materie und Energie zu durchdringen. Das gelingt ihr, indem sie Materie und Energie derart umgestaltet, dass sie ihre Denk- und Rechenfähigkeiten zu maximieren (basierend auf Grenzen, die wir im 3. Kapitel besprechen werden) und über die Erde hinaus weiterzuverbreiten vermag.

Momentan gilt die Lichtgeschwindigkeit als Obergrenze der Informationsübertragung. Die Frage, ob diese Beschränkung umgangen

werden kann, ist reine Spekulation. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass es möglich sein könnte¹⁵, und falls es auch nur das kleinste Schlupfloch gibt, werden wir uns der Überlichtgeschwindigkeit bemächtigen. Je nachdem, wie nachgiebig das Universum sich in diesem Punkt zeigt, wird es von unserer Zivilisation langsamer oder schneller erobert werden. In jedem Fall werden „dumme“ Materie und Abläufe im Universum umfunktioniert werden zu einer Form höchster, erhabenster Intelligenz, welche die sechste Epoche der Informationsevolution ausmacht.

Dies ist das ultimative Schicksal der Singularität und des Universums.

Die Singularität ist nah

Alles wird anders, weißt du... Nein, ich meine ganz anders!

MARK MILLER (INFORMATIKER) UM 1986 ZU ERIC DREXLER

Was sind die Konsequenzen dieses Ereignisses? Der Fortschritt wird sehr viel schneller sein, wenn er durch übermenschliche Intelligenz vorangetrieben wird. Im Prinzip spricht nichts dagegen, dass dieser Fortschritt dann immer intelligentere Wesen hervorbringt – in immer kürzerer Zeit. Ähnliches kann man in der natürlichen Evolution beobachten: Tiere können sich zwar Problemen anpassen und Erfindungen machen, aber meistens sind sie damit nicht schneller als die natürliche Auslese – im Falle der natürlichen Selektion ist die Welt selbst die Simulationsumgebung. Wir Menschen haben dagegen die Fähigkeit, die Welt zu verinnerlichen und in unseren Köpfen die Frage, „Was wäre wenn...?“ durchzuspielen. Manche Probleme lösen wir dadurch tausendfach schneller als die natürliche Selektion. Indem wir nun die Voraussetzungen schaffen, um diese Simulationen wiederum sehr viel schneller auszuführen, betreten wir ein neues Zeitalter, das von unserer menschlichen Vergangenheit so verschieden ist, wie die Menschen von den niederen Tiergattungen. Dem menschlichen Betrachter werden diese Veränderungen wie ein augenblicklicher Verfall aller bisherigen Regeln erscheinen, ein exponentielles, völlig unkontrollierbares Durchgehen.

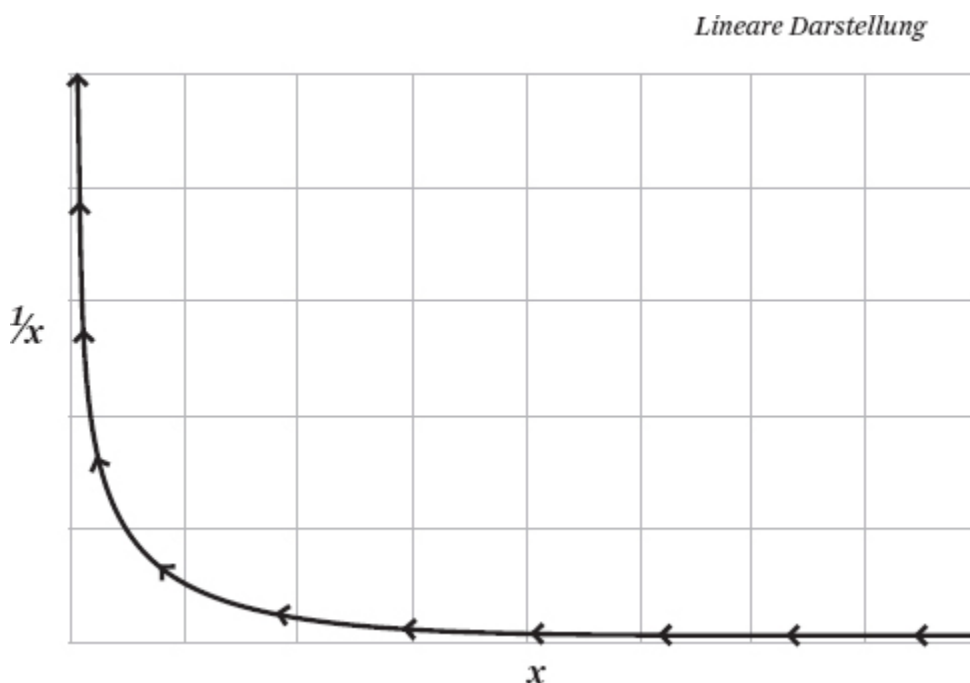
VERNOR VINGE, „THE TECHNOLOGICAL SINGULARITY“, 1993

Eine ultraintelligente Maschine sei definiert als eine Maschine, die jeden noch so klugen Mann in jeglicher intellektuellen Betätigung weit überbietet. Da das Bauen von Maschinen eine solche Betätigung ist, könnte eine menschengemachte ultraintellectuelle Maschine folgerichtig noch intelligentere Maschinen bauen; es käme fraglos zu einer „Intelligenzexplosion“, die die menschliche Intelligenz weit hinter sich ließe. Darum ist die ultraintelligente Maschine die letzte Erfindung, die der Mensch jemals zu machen hat.

IRVING JOHN GOOD, „SPECULATIONS CONCERNING THE FIRST ULTRAINTELLIGENT MACHINE“, 1965

Lasst uns den Singularitätsbegriff von einer anderen Seite beleuchten und die Geschichte des Wortes untersuchen. „Singularity“ ist zunächst einmal englisch für ein einzigartiges Ereignis mit einzigartigen Auswirkungen. Die Mathematik übernahm das Wort, um einen Wert zu beschreiben, der alle endlichen Schranken übersteigt, etwa wenn man eine Konstante durch eine Zahl teilt, die gegen Null geht. Nehmen wir zum Beispiel die simple Funktion $y = 1/x$. Wenn sich der Wert von x der Null annähert, wird der Funktionswert (y) größer und größer.

Eine mathematische Singularität



Eine mathematische Singularität: Geht x gegen Null (von rechts nach links), geht $1/x$ (oder y) gegen Unendlich.

Der Wert solcher Funktionen ist nie wirklich unendlich, da Division durch Null mathematisch „undefiniert“ (nicht berechenbar) ist. Aber der Wert von y wird beliebig groß (geht gegen unendlich), wenn x gegen Null geht.

Als Nächstes adaptierten Astrophysiker das Wort. Nach der Explosion eines schweren Sternes (einer Supernova) kollabieren dessen Überbleibsel auf einen ausdehnungslosen Punkt unendlicher Dichte – eine physikalische „Singularität“. Da man annahm, dass ein unendlich verdichteter Stern alles Licht verschlucken müsste¹⁶, nannte man einen solchen Punkt ein Schwarzes Loch¹⁷. Es handelt sich dabei um einen Bruch des Raum-Zeit-Kontinuums.

Es gibt auch die Theorie, dass das Universum selbst mit einer solchen Singularität begann.¹⁸ Wie dem auch sei, der Ereignishorizont (wenn man so will die Oberfläche) eines Schwarzen Lochs ist bemerkenswerterweise von endlicher Größe, und die Gravitation seines ausdehnungslosen Zentrums ist nur theoretisch unendlich groß. An jedem messbaren Ort sind die Kräfte endlich, wenn auch extrem groß.

Das obenstehende Zitat von John von Neumann ist die erste Erwähnung der Singularität im Sinne eines Ereignisses, welches das Kontinuum der Menschheitsgeschichte zu zerreißen droht. In den 1960ern beschrieb I. J. Good eine „Intelligenzexplosion“, die dazu führt, dass intelligente Roboter ohne menschliches Zutun ihre nächste Generation entwickeln. Über eine schnell heraufziehende „technologische Singularität“ schrieb 1983 Vernor Vinge, Mathematiker und Computerwissenschaftler an der San Diego State University, in einem Artikel für die Zeitschrift *Omni*, sowie in seinem Science-Fiction-Roman *Marooned in Realtime* (1986)¹⁹.

Mein Buch *The Age of Intelligent Machines* (1989) schildert die unaufhaltsame Entwicklung von Maschinen, die weitaus intelligenter sind als Menschen, in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts.²⁰ Hans Moravcs Buch *Mind Children* (1988) kommt anhand der Analyse von Fortschritten der Robotik zu ähnlichen Schlüssen.²¹ Vinge stellte 1993 auf einem Symposium der NASA eine Arbeit vor, welche die Singularität als ein bevorstehendes Ereignis beschreibt, das hauptsächlich durch das Auftreten von „Entitäten übermenschlicher Intelligenz“ gekennzeichnet ist, worin er den Vorboten einer nicht mehr kontrollierbaren Entwicklung erkannte.²² Mein Buch *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence* (1999) beschreibt die immer engere Verbindung zwischen natürlicher und von uns erschaffener künstlicher Intelligenz.²³

Hans Moravec bezeichnet in *Robot: Mere Machine to Transcend Mind* (ebenfalls 1999) die Roboter der 2040er Jahre als „evolutionäre Erben“, Maschinen, „die von uns abstammen, unsere Fähigkeiten erlernen und unsere Ziele und Werte teilen, [...] Kinder unseres Geistes“.²⁴ Der Australier Damien Broderick veröffentlichte zwei Bücher unter dem Namen *Spike* (1997 und 2001), in denen er die weitreichenden Auswirkungen der in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden extremen Beschleunigung der Technikentwicklung analysiert.²⁵ John Smart beschreibt die Singularität in einer langen Reihe von Veröffentlichungen als Resultat einer „MEST“-Kompression. (MEST steht für Mathematik, Energie, Raum und Zeit).²⁶

Ich denke die Singularität hat viele Gesichter. Sie ist der quasi senkrechte Abschnitt der exponentiellen Wachstumskurve, das Stadium, in dem der technische Fortschritt unendlich schnell zu sein scheint. Natürlich gibt es dabei keine mathematische Unstetigkeit, keinen echten Bruch, und die Wachstumsraten bleiben, trotz aller Außerordentlichkeit, endlich. Aber in unserem *derzeitigen*, begrenzten Betrachtungsrahmen erscheinen die bevorstehenden Vorgänge wie ein plötzlicher, abrupter Abriss der Gleichmäßigkeit des Fortschritts – mit Betonung auf „derzeitig“, denn eine der herausstechenden Folgen der Singularität ist die Erweiterung unseres Auffassungsvermögens. Die Verschmelzung mit der Technik wird uns klüger machen – und zwar um Längen.

Kann der technische Fortschritt wirklich unendlich schnell werden? Ist nicht irgendwann der Punkt erreicht, an dem die Menschen schlichtweg zu langsam denken, um mitzukommen? Für den herkömmlichen, nicht verbesserten Menschen ist das ganz klar der Fall. Aber was könnten 1000 Wissenschaftler alles erreichen, wenn sie jeweils 1000 Mal klüger wären als heutige, menschliche Forscher, und 1000 Mal schneller (weil die Datenverarbeitung in ihren vorwiegend nichtbiologischen Gehirnen viel schneller abläuft)? Ein Kalenderjahr wäre für sie wie ein Millennium.²⁷ Was würden sie wohl alles aushecken?

Nun, vor allen Dingen würden sie neue Technik entwickeln, die sie noch intelligenter macht (denn ihre geistige Kapazität ist nicht länger festgeschrieben). Sie würden ihren eigenen Denkprozess tunen, und wenn sie dann eine Million Mal klüger und eine Million Mal schneller wären,

bräuchten sie nur noch eine Stunde für ein Jahrhundert technischer Entwicklung (nach heutigem Maßstab).

Die Singularität umfasst folgende Prinzipien, die ich im Verlauf des Buches beschreiben, erläutern, analysieren und auswerten werde:

- Das Tempo des Paradigmenwechsels (die Häufigkeit technischer Innovationen) nimmt zu und verdoppelt sich momentan alle zehn Jahre.²⁸
- Die Leistungsfähigkeit (Preis-Leistungs-Verhältnis, Geschwindigkeit, Kapazität und Bandbreite) der Informationstechnik wächst zunehmend exponentiell und verdoppelt sich momentan alle zehn Jahre.²⁹ Dies trifft für eine breite Anzahl von Kenngrößen zu, einschließlich der Gesamtmenge menschlichen Wissens.
- Für Informationstechnik existiert eine zweite Ebene exponentiellen Wachstums, das heißt die exponentielle Wachstumsrate (der Exponent) wächst selbst exponentiell. Der Grund: Je rentabler ein Technikzweig ist, desto mehr wird in seine Verbesserung investiert. Die Computerindustrie beispielsweise bestand in den 1940ern in einer Handvoll historisch wichtiger Projekte. Heute, da die Branche Umsätze von über einer Billion Dollar verzeichnet, sind die Forschungsetats natürlich entsprechend größer.
- Gehirnschans sind eine dieser sich exponentiell verbessernden Techniken. Wie wir in Kapitel 4 sehen werden, verdoppeln sich räumliche und zeitliche Auflösung sowie die Bandbreite von Gehirnaufnahmen jährlich. Wir gelangen gerade in Besitz der Mittel für ein ernsthaftes Reverse Engineering* der Arbeitsweise des menschlichen Gehirns. Wir verfügen bereits über eindrucksvolle Modelle und Simulationen für ein paar Dutzend Gehirnregionen. Es gibt einige Hundert solcher Regionen, und in zwei Jahrzehnten werden wir über ein detailliertes Verständnis der Arbeitsweise jeder einzelnen verfügen.
- Bis zum Ende des Jahrzehnts werden wir die nötige Hardware haben, um menschliche Intelligenz auf Supercomputern zu simulieren; bis zum Ende des nächsten Jahrzehnts auf Heimcomputern. Mitte der 2020er Jahre wird es funktionierende Software-Nachbildungen der menschlichen Intelligenz geben.

- Da sowohl Hardware als auch Software bereit sein müssen, können wir gegen Ende der 2020er Jahre mit den ersten Computern rechnen, die den Turing-Test bestehen – was darauf hindeuten würde, dass Computerintelligenz nicht mehr von der Intelligenz biologischer Menschen unterscheidbar ist.³⁰
- Wenn Computer diesen Entwicklungsstand erreichen, kombinieren sie die traditionellen Stärken menschlicher und maschineller Intelligenz.
- Zu den traditionellen menschlichen Stärken gehört eine große Begabung zur Mustererkennung. Die massive Parallelität und autonome Organisation des Gehirns sind optimale Voraussetzungen für ein Erkennen von versteckten Regelmäßigkeiten im Chaos. Des Weiteren können Menschen aus Erfahrungen und aus sprachlichen Informationen lernen, daraus Schlüsse ziehen und Prinzipien ableiten. Eine menschliche Schlüsselkompetenz besteht darin, mentale Abbilder der Realität zu erstellen, sie zu variieren und Gedankenexperimente durchzuführen.
- Eine traditionelle Stärke von Computern ist es, Millionen von Fakten exakt zu speichern und jederzeit sofort abrufen zu können.
- Ein weiterer Vorteil von Maschinen ist, dass sie einmal erlernte Fertigkeiten schnell und beliebig oft akkurat anwenden können, ohne müde zu werden.
- Was vielleicht am wichtigsten ist: Maschinen können ihr Wissen extrem schnell kommunizieren – verglichen mit dem zwischenmenschlichen Austausch per Sprache.
- Nichtbiologische Intelligenz wird Wissen und Können einfach downloaden können – von anderen Maschinen und eines Tages auch von Menschen.
- Die maschinelle Signalübertragung wird annähernd Lichtgeschwindigkeit (etwa dreihundert Millionen Meter pro Sekunde) erreichen. Ein Säugetierhirn kommt dagegen auf gerade mal einhundert Meter pro Sekunde – ein Geschwindigkeitsunterschied von drei Millionen zu eins.³¹
- Das Internet wird den Maschinen Zugriff auf das gesamte Wissen der Mensch-Maschinen-Zivilisation gewähren – und sie werden es vollständig verstehen.

- Mehrere Maschinen können ihre Ressourcen, ihre Intelligenz und ihre Erinnerungen zusammenführen. Zwei Maschinen – oder eine Million – können verschmelzen und sich wieder trennen. Sie können auch zugleich vereint und getrennt sein; Menschen nennen das Liebe, aber das biologische Pendant ist vergänglich und unzuverlässig.
- Die Kombination dieser traditionellen Stärken (die Fähigkeit zur Mustererkennung der biologischen menschlichen Intelligenz einerseits, die Schnelligkeit, Speicherkapazität, Präzision, und die Fähigkeit zum Wissenstransfer der nichtbiologischen Intelligenz andererseits) wird – eine ganz und gar außerordentliche Angelegenheit!
- Diese künftige maschinelle Intelligenz ist völlig frei konzipierbar (uneingeschränkt durch zähflüssige Synapsenaktivität und Schädelgröße) und liefert dauerhaft konstante Leistung.
- Der nichtbiologische Teil unserer Zivilisation, die künstliche Intelligenz, welche die Stärken von Mensch und Maschine vereint, wird fortwährend profitieren vom doppelt exponentiellen Wachstum des Preis-Leistungs-Verhältnisses, der Schnelligkeit und Kapazität von Computern.
- Wenn Maschinen fähig werden, nach Menschenart (nur viel schneller) Technik zu entwickeln und umzusetzen, können sie auch ihren eigenen Aufbau (beispielsweise ihren Quellcode) überarbeiten. Menschen gelingt bereits Vergleichbares durch die Biotechnik (indem sie genetische und andere biologische Informationen manipulieren), aber auf eine viel begrenztere und langsamere Art und Weise, als das bei den Maschinen, die ihre eigenen Programme anpassen, der Fall sein wird.
- Natürliche Lebewesen haben inhärente Einschränkungen. Beispielsweise bestehen sie allesamt aus Eiweißen (Proteinen), und diese wiederum sind Faltgebilde aus eindimensionalen Aminosäureketten. Eiweißbasierten Mechanismen mangelt es an Stärke und Schnelligkeit. In der Zukunft werden wir alle Organe und Systeme unseres Körpers und Gehirns neu konzipieren und erheblich verbessern.
- Wie wir in **Kapitel 4** sehen werden, verfügt die menschliche Intelligenz über eine gewisse Plastizität (die Fähigkeit ihre Struktur

zu verändern und anzupassen), die größer ist, als bislang vermutet. Nichtsdestotrotz ist die Bauweise unseres Gehirns stark eingeschränkt. Beispielsweise passen nur etwa einhundert Billionen Neuronenverbindungen in unseren Schädel. Eine entscheidende Voraussetzung für die erhöhten kognitiven Fähigkeiten des Menschen gegenüber seinen tierischen Vorfahren war die Vergrößerung der Großhirnrinde und die Zunahme der grauen Substanz in bestimmten Gehirnregionen.³² Dazu kam es allerdings erst durch langwierige biologische Evolution, während der die Gehirnkapazität zwar gewachsen ist, aber dennoch begrenzt blieb. Die Maschinen werden bei der Verbesserung ihres Designs und ihrer Kapazitäten nicht an solche Grenzen stoßen. Durch Nanotechnik werden sie, bei gleichbleibender Größe und Energiebedarf, die Fähigkeiten natürlicher Gehirne weit übertreffen.

- Maschinen werden dreidimensionale Molekularschaltungen einsetzen. Heutige Schaltnetze sind über eine Million Mal schneller als die elektrochemischen Schaltungen in Säugetierhirnen. Die Schaltkreise von morgen werden unter anderem auf molekularen Nanoröhren basieren: winzige Zylinder aus Kohlenstoff, die – mit einem Durchmesser von zehn Atomen – fünfhundert Mal kleiner sind als aktuelle Silizium-Transistoren. Weil Signale in Kohlenstoff-Nanoröhren weniger Distanz zurücklegen müssen, können damit Taktfrequenzen im Terahertz-Bereich (Billionen Operationen pro Sekunde) erzielt werden, anstatt der wenigen Gigahertz (Milliarden Operationen pro Sekunde) heutiger Chips.
- Technischer Fortschritt wird nicht mehr an menschliche Denkgeschwindigkeit gekoppelt sein. Die Maschinenintelligenz wird ihre eigenen Fähigkeiten in einer rückgekoppelten Endlosschleife dermaßen verbessern, dass nicht unterstütztes menschliches Denken nicht mehr mithalten kann.
- Dieses Karussell von Verbesserungsschritten wird sich schneller und schneller drehen. Genau das ergibt sich auch aus der Formel für die kontinuierliche Beschleunigung des Paradigmenwechsels. Ein häufiger Einwand dagegen ist, dass sich der Wechsel laut der Formel irgendwann so schnell vollziehen würde, dass kein Mensch mehr mitkäme – und sie deshalb irgendwann ungültig werden muss.

Jedoch wird der Übergang zu nichtbiologischer Intelligenz die Beschleunigung aufrechterhalten.

- Im Zuge des Verbesserungskreislaufs wird Nanotechnik ermöglichen, die physische Realität auf molekularer Ebene umzugestalten.
- Mit der Nanotechnik kommen Nanobots: im Molekularbereich gefertigte Roboter, nur wenige Mikrometer (millionstel Meter) groß – zum Beispiel „Respirozyten“ (künstliche rote Blutkörperchen).³³ Nanobots werden unzählige Aufgaben im menschlichen Körper übernehmen und unter anderem den Alterungsprozess aufhalten (insoweit dies der Biotechnik noch nicht gelungen ist).
- Nanobots werden sich direkt ins biologische Nervensystem einklinken um die menschlichen Sinne zu erweitern und eine virtuelle Realität zu schaffen.
- Milliarden von Nanobots in den Hirnkapillaren werden außerdem die menschliche Intelligenz vergrößern.
- Sobald künstliche Intelligenz im menschlichen Hirn Fuß gefasst hat (was sich in Form von computerisierten Neuroimplantaten bereits abzeichnet), wird unsere (maschinelle) Hirnleistung exponentiell wachsen und sich jährlich mindestens verdoppeln. Da die biologische Kapazität beschränkt bleibt, wird letztendlich der nichtbiologische Anteil unserer Intelligenz überwiegen.
- Nanobots werden die Umweltverschmutzung der Industrialisierung bereinigen.
- Intelligenter Nanonebel aus sogenannten *foglets*^{*}, der beliebige Bilder und Klänge erzeugen kann, wird die Wandlungsfähigkeit der virtuellen Welt real machen.³⁴
- Maschinen werden unsere emotionale Intelligenz durchschauen und besitzen. Darunter zu verstehen ist die Fähigkeit, eigene und fremde Gefühle zu erkennen und darauf zu reagieren. Manche Gefühlsregungen dienen dazu, unsere körperlich begrenzte Intelligenz zu optimieren. Auch die Maschinenintelligenz der Zukunft wird „Körper“ haben (virtuelle Körper in einer virtuellen Realität oder deren physische Projektionen durch Nanonebel), durch die sie mit der Welt interagieren. Aber diese nanogefertigten Körper werden viel leistungsfähiger und robuster sein als der menschliche Leib. Darum wird die Maschinenintelligenz auch anders „fühlen“:

Ihre überarbeiteten Emotionen werden ihrem verbesserten Körperbau entsprechen.³⁵

- Die direkt im Nervensystem erzeugte virtuelle Realität wird mit zunehmender Auflösung und Glaubwürdigkeit in Konkurrenz zur echten Welt treten und einen immer größeren Teil unserer Wahrnehmung ausmachen.
- In der virtuellen Welt können wir uns in eine andere Person verwandeln – sowohl physisch als auch emotional. Es ist dann auch möglich, dass andere Personen (zum Beispiel der Partner) uns völlig anders wahrnehmen, als wir uns selbst (und umgekehrt).
- Das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs bleibt solange gültig, bis alle verfügbare Materie und Energie mit Mensch-Maschinen-Intelligenz „gesättigt“ ist. Gesättigt heißt, dass alle Materie und Energie (nach unserem Verständnis) optimal zum Rechnen und Denken beiträgt. Wenn wir uns diesem Punkt nähern, wird unsere Zivilisation ihren Intelligenzzuwachs weiter treiben, indem sie sich über das restliche Universum ausbreitet. Diese Ausbreitung wird bald die maximale Geschwindigkeit für Informationsübertragung erreichen.
- Letztendlich wird unsere Intelligenz das gesamte Weltall durchdringen. Das ist die Bestimmung des Universums (siehe **Kapitel 6**). Dann werden wir selbst anstelle der „dummen“, simplen, maschinenhaften Kräfte der Himmelsmechanik über unser Fortbestehen entscheiden.
- Wie lange es dauert, bis das ganze Universum intelligent ist, hängt davon ab, ob die Lichtgeschwindigkeit wirklich eine unumstößliche Beschränkung darstellt. Es gibt derzeit Anzeichen für die Möglichkeit feinsten Ausnahmen, und falls es wirklich Unregelmäßigkeiten geben sollte, wird unsere Zivilisation sie zu nutzen verstehen.

All das ist also mit Singularität gemeint. Manche sind der Meinung, dass wir sie nicht verstehen können, zumindest nicht von unserem jetzigen Standpunkt, und dass wir nicht über ihren Ereignishorizont hinaus blicken können. Daher kommt auch die Bezeichnung „Singularität“.

Nach jahrelangen Überlegungen finde ich es zwar nicht unmöglich, aber doch sehr schwierig, hinter diesen Horizont zu sehen. Trotz der engen

Grenzen unseres Denkens bin ich jedoch der Ansicht, dass unser Abstraktionsvermögen ausreicht, um sinnvolle Aussagen über das Leben nach der Singularität zu machen. Die wichtigste Aussage ist die, dass die neue Intelligenz für eine *weiterhin menschliche* Mensch-Maschinen-Zivilisation steht. In anderen Worten: Die Maschinen werden menschlich sein, auch wenn sie nicht biologisch sind. Darin besteht der nächste Evolutionsschritt, der nächste große Paradigmenwechsel, die nächste Vermittlungsstufe. Die meiste Intelligenz der Zivilisation wird letztlich nichtbiologisch sein. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird sie das menschliche Denkvermögen viele Milliarden Mal übersteigen.³⁶ Das wird jedoch nicht, wie häufig befürchtet, das Ende der biologischen Intelligenz sein, obgleich diese dann als Krone der Schöpfung abdanken muss. Denn auch die nichtbiologischen Kreationen werden von biologischer Abstammung sein. Unsere Zivilisation bleibt menschlich – sie wird der Menschlichkeit sogar in vielerlei Hinsicht mehr Ehre machen als die heutige; der Menschheitsbegriff wird sich jedoch von seinen biologischen Wurzeln lösen.

Das Entstehen von nichtbiologischen, dem Menschen überlegenen Intelligenzformen verursacht vielerorts großes Unbehagen (worüber wir in **Kapitel 9** sprechen werden). Die Aussicht, unsere eigene Intelligenz durch Anschluss an andere Gedankenträger zu erweitern, ist nicht unbedingt ein Trost: Viele Menschen würden gerne „unverbessert“ bleiben, ohne die Spitze der intellektuellen Nahrungskette aufzugeben. So betrachtet würde die übermenschliche Intelligenz dem biologischen Menschen ein getreuer Diener sein, der all seine Wünsche erfüllt. Aber das Zufriedenstellen ihrer altehrwürdigen biologischen Ahnen wird allenfalls eine triviale Nebentätigkeit der gewaltigen Denkkräfte der Singularität.

MOLLY (von 2004): *Woher weiß ich, wann es soweit ist? Ich meine, ich hätte gern etwas Vorbereitungszeit.*

RAY: *Wieso, was hast du denn vor?*

MOLLY 2004: *Also, als Erstes würde ich meinen Lebenslauf ein bisschen aufpolieren. Ich will ja einen guten Eindruck machen, bei den Mächten der Zukunft.*

GEORGE (von 2048): *Ach so, na das kann ich für dich erledigen.*

MOLLY 2004: *Nicht nötig, ich mach das schon. Ich sollte vielleicht auch ein paar Akten schreddern... ich glaube, ich war da etwas... unwirsch gegenüber gewissen Maschinen in meinem Bekanntenkreis.*

GEORGE 2048: *Das erfahren die Maschinen so oder so – aber mach dir keine Sorgen, sie sind äußerst verständnisvoll.*

MOLLY 2004: *Irgendwie beruhigt mich das nicht so richtig. Ich hätte trotzdem gerne eine Vorwarnung.*

RAY: *Okay, okay. Also, dass die Singularität bevorsteht, merkst du daran, dass du eine Million E-Mails im Posteingang hast.*

MOLLY 2004: *Hm, das klingt als wäre es jeden Moment soweit. Aber im Ernst, ich habe jetzt schon Probleme, mit den tausend Neuentwicklungen halbwegs klarzukommen. Wie soll das denn bitte bei Singularitätsgeschwindigkeit funktionieren?*

GEORGE 2048: *Dafür hast du dann virtuelle Assistenten. Naja, eigentlich reicht einer.*

MOLLY 2004: *Lass mich raten – das bist dann du?*

GEORGE 2048: *Zu Diensten.*

MOLLY 2004: *Na toll. Du kümmerst dich um alles und ich brauche gar nicht mehr Bescheid zu wissen, oder was? „Ach, Molly kapiert das eh nicht, lassen wir Molly einfach fröhlich im Dunkeln tapen“.*

GEORGE 2048: *Ganz und gar nicht...*

MOLLY 2004: *Gar nicht fröhlich?*

GEORGE 2048: *Nein, im Dunkeln tapen. Du wirst durchaus alles mitbekommen und verstehen, was ich so treibe.*

MOLLY 2004: *Wieso, bin ich dann...*

RAY: *„Verbessert“?*

MOLLY 2004: *Ja.*

GEORGE 2048: *Naja, es kann doch nicht schaden, das Beste aus unserer Beziehung zu machen.*

MOLLY 2004: *Sollte ich nicht versuchen, ich selbst zu bleiben?*

GEORGE 2048: *Du hast ja weiterhin das Sagen. Aber ich kann viel mehr sein, als nur dein transzendenter Laufbursche!*

MOLLY 2004: „Nur“ mein Laufbursche klingt eigentlich gar nicht so übel.

CHARLES DARWIN: Wenn ich kurz unterbrechen dürfte: Wenn Maschinen klüger werden, als Menschen, dann können sie doch auch von selbst ihre nächste Generation entwickeln.

MOLLY 2004: Klingt plausibel, Maschinen werden ja jetzt schon von Maschinen gebaut.

CHARLES: Genau. 2004 werden sie zwar noch von Menschen gesteuert, aber sobald Maschinen den Menschen ersetzen, schließt sich der Teufelskreis.

NED LUDD³⁷: Und damit ist der Mensch raus.

MOLLY 2004: Aber ein ziemlich langsamer Teufelskreis.

RAY: Gar nicht! Wenn man ein künstliches Wesen mit menschenartigem Gehirn bauen würde – selbst mit der Prozessortechnik von 2004 wäre dieses Kerlchen dann...

MOLLY 2004: Du meinst „dieses Mädchen“.

RAY: Ähm. Ja, genau. Also, dieses Mädchen würde millionenfach schneller denken.

TIMOTHY LEARY: Die subjektive Zeit würde gedehnt.

RAY: Ganz genau.

MOLLY 2004: Was würdet ihr Maschinen denn mit eurer ganzen subjektiven Zeit anfangen?

GEORGE 2048: Es gibt genug zu tun. Zum Beispiel im Internet surfen. Durch das gesammelte Wissen der Menschheit.

MOLLY 2004: Und was ist mit dem gesammelten Wissen der Maschinenheit?

GEORGE 2048: Wir sehen das als eine gemeinsame Zivilisation.

CHARLES: Maschinen können sich dann also selbst verbessern?

MOLLY 2004: Das können wir Menschen doch auch schon.

RAY: Aber wir basteln nur an ein paar Details herum. DNS-basierte Intelligenz ist ja so schrecklich beschränkt und langsam...

CHARLES: Und Maschinen entwickeln ihre nächste Generation relativ zügig.

GEORGE 2048: Ganz genau so sieht's aus, im Jahre 2048.

CHARLES: *Eine neue Evolutionslinie also.*

NED: *Klingt mehr wie eine bedenkliche Eskalation.*

CHARLES: *Evolution ist im Prinzip nichts anderes.*

NED: *Aber wie werden diese Maschinen mit ihren Erschaffern umspringen?
Ich möchte denen nicht in die Quere kommen! Damals, in den 1800er
Jahren, da hab' ich mich vor den englischen Behörden versteckt, aber
das wird nicht so leicht mit diesen...*

GEORGE 2048: *Leute!*

MOLLY 2004: *Mit diesen Mini-Robo-Dingern, meinst du?*

RAY: *Du meinst Nanobots.*

MOLLY 2004: *Ja, vor denen kann man sich schlecht verstecken.*

RAY: *Ich würde mal hoffen, dass die Intelligenz, die mit der Singularität
entsteht, Respekt vor ihrem biologischen Erbe zeigt.*

GEORGE 2048: *Absolut! Mehr als Respekt. Ehrfurcht.*

MOLLY 2004: *Klasse, George. Ich werde dein hochverehrtes Schoßhündchen.
So hab' ich mir das nicht vorgestellt.*

NED: *Das sind Ted Kaczynskis Worte: Wir werden zu Haustieren.
Zufriedene Haustiere, aber sicher keine freien Menschen.*

MOLLY 2004: *Genau, und was ist mit der sechsten Epoche? Wenn ich
biologisch bleibe, blockiere ich kostbare Energie und Materie mit
meinem ach so ineffizienten Körper – und ihr wollt mich zu einer
Milliarde virtueller Mollys und Georges recyceln oder so. Klingt, als
stünde man ziemlich unter Druck, zu konvertieren.*

RAY: *Du stellst so einen winzigen Bruchteil der Materie und Energie dar,
dass es in der Singularität nicht viel ausmacht. Es wird sich lohnen,
das biologische Erbe zu erhalten.*

GEORGE 2048: *Absolut.*

RAY: *So wie wir heute versuchen, den Regenwald und die Artenvielfalt zu
erhalten.*

MOLLY 2004: *Genau, und das klappt so toll, das kaum noch was davon übrig
ist. Mit uns passiert doch dasselbe wie mit all den bedrohten Tierarten.*

NED: *Oder den ausgestorbenen.*

MOLLY 2004: *Und es geht nicht nur um meinen Körper. Was ist mit meinen Sachen? Ich habe ganz schön viele Sachen!*

GEORGE 2048: *Kein Problem, alles wird recycelt. Wir gestalten deine Umgebung jederzeit so, wie du es gerade brauchst.*

MOLLY 2004: *In einer virtuellen Realität?*

RAY: *Nein, im Nanonebel.*

MOLLY 2004: *Ich lebe dann im Nebel?*

RAY: *Im Nanonebel.*

MOLLY 2004: *Bitte was?*

RAY: *Das kommt weiter hinten im Buch.*

MOLLY 2004: *Jetzt hast du mich schon neugierig gemacht.*

RAY: *Nanonebel sind Schwärme von Nanobots. Roboter so groß wie ein Blutkörperchen. Die können sich dann zu jeder beliebigen physikalischen Struktur verdichten. Und sie können beliebige Töne und Klänge erzeugen. Damit wird die reale Realität genauso wandlungsfähig wie die virtuelle.³⁸*

MOLLY 2004: *Hätte ich bloß nicht gefragt. Aber ich will nicht nur meinen Kram, ich will auch Tiere und Pflanzen. Auch die, die ich nicht sehe – ich will einfach, dass sie da sind.*

GEORGE 2048: *Aber nichts davon wird verloren gehen!*

MOLLY 2004: *Das sagst du dauernd. Ich meine richtig da, als biologische Realität.*

RAY: *Auch das sollte kein Problem sein, die komplette Biomasse macht weniger als ein Millionstel der Masse und Energie unseres Sonnensystems aus.*

CHARLES: *Aber einen großen Teil des Kohlenstoffs.*

RAY: *Es lohnt sich trotzdem, alles zu erhalten. Zur Sicherheit. Damit nichts verloren geht.*

GEORGE 2048: *Das ist bei uns seit mehreren Jahren Konsens.*

MOLLY 2004: *Also habe ich dann alles, was ich mir nur wünschen kann?*

GEORGE 2048: *So ist es.*

MOLLY 2004: *Klingt nach König Midas. Der alles, was er berührt, in Gold verwandelt.*

NED: *Ja, und wie du dich sicher erinnerst, ist er verhungert.*

MOLLY 2004: *Ich denke eher, ich würde mich zu Tode langweilen, mit all meiner subjektiven Freizeit.*

GEORGE 2048: *Oh, dir wird nicht langweilig – dafür werde ich sorgen!*

KAPITEL 2

Eine Theorie der technischen Evolution

Das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs

Je weiter man zurückblickt, desto weiter sieht man voraus.

WINSTON CHURCHILL

Vor zwei Milliarden Jahren waren unsere Vorgänger Mikroben; vor einer halben Milliarde Jahre Fische; vor hundert Millionen Jahren irgendwas in der Art von Mäusen; vor zehn Millionen Jahren Affen in den Bäumen; vor einer Million Jahre Frühmenschen, die austüftelten, wie man das Feuer zähmt. Unser Stammbaum ist von Anpassungen an Veränderungen gezeichnet. In der heutigen Zeit wird das Tempo immer schneller.

CARL SAGAN

Wir sind ausschließlich dafür verantwortlich, etwas Schläueres als uns selbst zu erschaffen; alles darüber hinaus ist nicht *unsere* Aufgabe [...] Es gibt keine schwierigen Aufgaben, sondern nur welche, die für eine gewisse Intelligenzstufe schwierig sind. Wenn man das kleinste Bit [der Intelligenzstufe] nach oben verschiebt, werden „unlösbare“ Probleme plötzlich „offensichtlich“. Alle Probleme werden trivial, wenn man nur weit genug aufsteigt.

ELIEZER S. YUDKOWSKY, *STARING INTO THE SINGULARITY*, 1996

„Man kann nicht in die Zukunft sehen“ ist eine geläufige Redensart... Aber falls sie falsch ist, dann in absolut jeglicher Hinsicht.

JOHN SMART¹

Die kontinuierliche Beschleunigung des technischen Fortschritts folgt aus einem Prinzip, das ich das „Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs“* nenne. Es erklärt, warum evolutionäre Prozesse allgemein immer schneller werden, und wieso sich ihre Produkte exponentiell vermehren. Zu solchen Produkten zählen insbesondere Datenverarbeitungsverfahren, konkret etwa die Computertechnik, deren Fortschritt selbst die kühnen Vorhersagen des sogenannten Moore'schen Gesetzes weit übertrifft. Die Singularität ist eine unausweichliche Folge des

Gesetzes vom steigenden Ertragszuwachs – darum wollen wir zunächst evolutionäre Prozesse genau unter die Lupe nehmen.

Der Begriff Ordnung. Das vorherige Kapitel veranschaulicht mit einigen Diagrammen die Beschleunigung von Paradigmenwechseln (im Sinne von einschneidenden methodischen Veränderungen und neuen intellektuellen Herangehensweisen an Aufgaben; gute Beispiele sind die geschriebene Sprache und der Computer). In den Diagrammen aufgetragen sind wichtige Ereignisse in der biologischen und technischen Evolution – nach Einschätzung von fünfzehn Analysten und Nachschlagewerken – vom Urknall bis zum Internet. Bereinigt man die unvermeidliche Varianz der Daten, so zeigt sich ein eindeutig exponentieller Trend: Schlüsselereignisse der Evolution treten in immer kürzer werdenden Abständen ein.

Die Kriterien für ein „Schlüsselereignis“ sind von Quelle zu Quelle verschieden. Nach Meinung einiger Analysten zeichnen sich wirklich epochale Veränderungen in der Entwicklungsgeschichte durch eine Zunahme von Komplexität aus.² Obwohl das zutreffend erscheint, bin ich mit dieser Aussage nicht ganz einverstanden. Doch lasst uns zunächst klarstellen, was eigentlich Komplexität ist.

Komplexität ist, wenig überraschend, ein komplexer Begriff. Eine mögliche Bedeutung des Wortes ist: die kleinste Menge an Information, die benötigt wird, um einen bestimmten Prozess zu beschreiben. Angenommen der Bauplan für irgendeine Art von System ist durch eine Computerdatei von einer Million Bits vollständig beschrieben. Wir könnten nun behaupten, diese Systembeschreibung hätte eine Komplexität von einer Million Bits. Nun stellen wir jedoch fest, dass die Datei aus tausend Wiederholungen eines eintausend Bits langen Musters besteht. Wir könnten einfach die Anzahl der Wiederholungen angeben, all die redundanten Kopien des Musters löschen und den ganzen Bauplan in etwas mehr als tausend Bits speichern – und die Dateigröße etwa um Faktor tausend reduzieren.

Übliche Datenkompressionsmethoden gehen ähnlich vor, um Redundanz in Informationen zu finden.³ Aber kann man nach der Kompression sicher sein, dass es nicht noch einen Trick gibt, um das Paket noch enger zu schnüren? Angenommen, unsere Datei bestünde einfach in der Zahl „Pi“

(3,1415...) mit einer Genauigkeit von einer Million Bits. Die meisten Packprogramme würden die Sequenz nicht erkennen und die Datei fast gar nicht verkleinern, da die Bits einer Binärdarstellung von Pi praktisch zufällig sind und somit kaum wiederkehrende Muster aufweisen.

Wenn wir jedoch merken, dass die Datei (oder ein Teil davon) aus Pi besteht, können wir sie (oder den entsprechenden Teil) äußerst kompakt als „Pi mit einem Näherungswert von 1 Million Bits“ speichern. Da wir nie sicher sein können, dass wir nicht eine noch prägnantere Darstellung unserer Datensequenz übersehen haben, ist jede Kompression lediglich eine obere Schranke der Komplexität von Informationen. Eine Definition von Komplexität in diesem Sinne stammt von Murray Gell-Mann: Er definiert den „Algorithmischen Informationsgehalt“ (AIG) einer Informationsmenge als „die Länge des kürzesten Programms, das auf einem Standardcomputer die entsprechende Bitsequenz ausgibt und dann terminiert“.⁴

Gell-Manns Konzept hat jedoch Schwächen. Rein zufällige Dateiinhalte sind überhaupt nicht komprimierbar. (Übrigens ein wichtiges Kriterium beim Test, ob eine zufällige Zahlenreihe wirklich zufällig ist). Wenn eine Zufallssequenz in unserem Bauplan jedoch *beliebig* ist, dann kann dieser Abschnitt einfach ersetzt werden, durch „füge eine Reihe von zufälligen Zahlen ein“. In dem Fall erzeugt also die Zufallssequenz keine nennenswerte Komplexität, da sie durch eine einzige, simple Anweisung beschreibbar ist. Darin besteht der Unterschied zwischen einer beliebigen Sequenz und einer unberechenbaren, aber sinnvollen Sequenz.

Für ein besseres Verständnis von Komplexität betrachten wir nun die Komplexität eines Steins. Wenn wir die Eigenschaften jedes seiner Atome (Ort, Drehimpuls, Spin, Geschwindigkeit und so weiter) festhalten wollten, ergäbe das eine gewaltige Informationsmenge. Ein 1 kg schwerer Stein hat 10^{25} Atome, welche, wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, bis zu 10^{27} Bits Information enthalten. Das ist einhundert Millionen Milliarden Mal soviel, wie der (unkomprimierte) genetische Code eines Menschen.⁵ Aber in den meisten Fällen ist diese Informationsmasse größtenteils zufällig und unerheblich. Für den Hausgebrauch können wir den Stein sehr viel einfacher beschreiben, etwa durch seine Form und Zusammensetzung. Es ist daher durchaus vernünftig anzunehmen, dass ein Stein weit weniger

komplex ist, als ein Mensch – obwohl der Stein theoretisch einen Ozean von Information enthält.⁶

Eine andere Auffassung von Komplexität lautet: die kleinste Menge *bedeutungsvoller, nicht zufälliger, aber unberechenbarer* Information, die nötig ist, um ein System oder einen Prozess zu beschreiben.

Nach Gell-Mann wäre der AIG einer Eine-Million-Bits-Zufallsreihe eine Million Bits groß. Darum erweitere ich das AIG-Konzept um die Idee, dass alle beliebig zufälligen Sequenzen durch die Anweisung „füge zufällige Bits ein“ ersetzt werden.

Doch selbst das ist nicht ausreichend, denn ein weiteres Problem sind externe* Daten, beispielsweise Namen und Nummern eines Telefonbuchs, oder Messreihen von Strahlungswerten oder Temperaturen. Solche Daten sind nicht zufällig, werden aber durch Kompressionsverfahren nur geringfügig reduziert. Dennoch erzeugen sie keine Komplexität im üblichen Sinne des Wortes. Wir brauchen also eine weitere Anweisung, die lautet: „Füge Datensequenz aus externer Quelle ein“.

Um es zusammenzufassen, schlage ich vor, die Komplexität einer Informationsmenge folgendermaßen zu bemessen: Man nehme den AIG nach der Definition von Gell-Mann, ersetze jede zufällige Sequenz durch die Anweisung, eine zufällige Sequenz einzufügen, und ersetze gleichermaßen alle Sequenzen externer Herkunft durch entsprechende Anweisungen. Daraus ergibt sich ein Komplexitätsmaß, das einigermaßen unserer Intuition entspricht.

Man kann sagen, dass die Paradigmenwechsel der biologisch-technischen Evolution jeweils mit einer Zunahme von Komplexität – im eben beschriebenen Sinne – verbunden sind. Das Paradigma „DNS-Molekül“ ermöglichte beispielsweise komplexere Organismen, da mit ihm plötzlich ein flexibler Datenspeicher für biologische Informationsprozesse zur Verfügung stand. Die Kambrische Explosion lieferte ein solides Sortiment von Tierarten und Körperbauplänen, woraufhin sich die Evolution in Ruhe mit der Entwicklung komplexerer Hirnstrukturen befassen konnte. Auf Seiten der technischen Entwicklung erlangte die Zivilisation mit dem Computer ein Mittel, um immer komplexere Informationsmengen zu

verarbeiten. Noch größere Komplexität brachte schließlich die weitflächige Vernetzung durch das Internet.

Reine Komplexitätszunahme ist jedoch nicht ultimatives Ziel und Endprodukt dieser Entwicklungsprozesse. Evolution führt zu *besseren*, aber nicht notwendigerweise komplexeren Lösungen – und manchmal sind einfache Lösungen die besten. Lasst uns darum einen anderen Begriff ins Auge fassen, nämlich den der Ordnung. Ordnung ist nicht einfach das Gegenteil von Unordnung, denn Unordnung kann zum Beispiel in einer Reihe zufälliger Ereignisse bestehen – das Gegenteil davon wäre „Nicht-Zufälligkeit“.

Information ist eine Datensequenz mit Bedeutung für einen Prozess, beispielsweise der DNS-Code eines Organismus oder die Bits eines Computerprogramms. „Rauschen“ dagegen ist eine rein zufällige Sequenz. Rauschen ist völlig unberechenbar und trägt keinerlei Information. Wenn wir andererseits neue Daten aus alten Daten berechnen können, dann sind die neuen Daten auch keine Informationen mehr. Darum können weder Informationen noch Rauschen komprimiert werden (so, dass die exakte Sequenz rekonstruiert werden kann). Ein sich wiederholendes Muster (zum Beispiel 0101010...) mag zwar geordnet erscheinen, aber es enthält nicht mehr Information als die ersten paar Bits.

Regelmäßigkeit ist also nicht gleich Ordnung, denn Ordnung erfordert Information. *Ordnung ist Information mit Zweck. Das Maß für Ordnung ist, wie gut die Information ihren Zweck erfüllt.* In der biologischen Evolution ist der Zweck Überleben. Für einen für die Entwicklung eines Düsentriebwerks konzipierten evolutionären Algorithmus (ein Programm, das Evolution simuliert, um ein Problem zu lösen) besteht der Zweck darin, Leistung, Effizienz und ähnliche Kriterien zu optimieren.⁷ Ordnung ist schwerer zu messen als Komplexität. Mögliche Maßstäbe für Komplexität haben wir bereits kennengelernt. Für Ordnung brauchen wir ein Maß von „Erfolg“, das auf die jeweilige Situation zugeschnitten ist. Beim Schreiben eines evolutionären Algorithmus muss der Programmierer dieses Maß (die Fitnessfunktion) festlegen. Der Erfolgsmaßstab der technischen Evolution ist Wirtschaftlichkeit.

Mehr Information führt nicht automatisch zu einer besseren Anpassung. Manchmal entsteht größere Ordnung – also mehr Zweckmäßigkeit – durch Vereinfachung. Wenn beispielsweise mehrere, scheinbar kontroverse Ideen in einer neuen, umfassenden Theorie vereint werden, dann sinkt die Komplexität, aber die „zweckdienliche Ordnung“ nimmt zu. Tatsächlich ist die Vereinfachung von Theorien ein wichtiges Gebot in der Wissenschaft. (Oder wie es Einstein formulierte: „Man muss die Dinge so einfach wie möglich machen, aber nicht einfacher“).

Ein zentrales Beispiel für dieses Prinzip – und ein entscheidender Schritt in der Evolution der Menschenaffen – ist die Verschiebung der Daumenausrichtung, welche ein präzises Hantieren mit der Umwelt möglich machte.⁸ Primaten, beispielsweise Schimpansen, können zwar prinzipiell greifen, haben jedoch Schwierigkeiten, Dinge richtig festzuhalten. Auch fehlt ihnen die nötige Feinmotorik, um zu schreiben oder Objekte zu formen. Obwohl die veränderte Daumenausrichtung die Tiere nicht nennenswert komplexer machte, führte sie zu einer Zunahme von Ordnung und ermöglichte unter anderem die Entstehung von Technik. Dennoch lehrt uns die Evolution, dass in aller Regel die Zunahme von Ordnung mit einer Zunahme von Komplexität einhergeht.⁹

Die Ordnung nimmt also zu, wenn man bessere – in der Regel komplexere, aber manchmal auch einfachere – Lösungen für ein bestimmtes Problem findet. Es bleibt das Definitionsproblem: Die Definition eines Ziels (und der Fitnessfunktion) ist das Herzstück jedes evolutionären Algorithmus. Das Ziel der natürlichen Evolution war immer das Überleben. Je nach ökologischer Nische leiten sich daraus spezifischere Ziele ab, etwa die Anpassung an extreme Umweltbedingungen oder das Tarnen vor Fressfeinden. Mit dem Übergang zum Hominiden verschob sich die allgemeine Zielsetzung: Das Überlisten von Gegnern und das Umgestalten der Umwelt zum eigenen Vorteil rückten in den Vordergrund.

Mit Hinsicht auf die zunehmende Ordnung steht das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs in scheinbarem Widerspruch zum zweiten Satz der Thermodynamik. Dieser besagt, dass die Entropie – das heißt, die Unordnung in einem geschlossenen System – niemals abnimmt, also in aller Regel zunimmt.¹⁰ Evolution ist jedoch kein geschlossenes System. Sie

findet mitten im Chaos statt; sie bezieht ihre Vielfalt aus der Unordnung, die sie umgibt. Durch eine Auslese dieser Vielfalt schafft sie immer höhere Ordnung. Schwere Krisen in der Geschichte des Lebens – da wäre zum Beispiel das Bombardement durch gigantische Asteroiden – vergrößerten zunächst das Chaos auf der Erde, verhalf der Evolution aber letztendlich zu noch höherer Ordnung.

Kurz gesagt: Evolution schafft höhere Ordnung, was in der Regel – aber nicht immer – größere Komplexität mit sich bringt. Die Evolution von Leben und Technik wird immer schneller, denn sie wird angetrieben durch ihre eigene, immer höhere Ordnung und durch immer ausgefeiltere Methoden, Informationen zu speichern und zu verändern. Im Fall der biologischen Evolution fällt darunter natürlich vor allem die DNS: sie bietet ein sicheres Medium für den Bauplan des Lebens und den Ausgangspunkt für weitere Experimente. Im Fall der technischen Evolution haben immer bessere Aufzeichnungsmethoden jeweils neue technische Entwicklungen ermöglicht: Die ersten Rechenmaschinen wurden mit Stift und Papier entworfen. Computer von morgen werden mithilfe der Computer von heute entwickelt und in vollautomatischen Fabriken ohne menschliches Zutun gefertigt.

Der technische Entwicklungsprozess vermehrt exponentiell sein eigenes Ausgangspotenzial. Erfinder versuchen bestehende Möglichkeiten zu vervielfachen; Innovation ist multiplikativ, nicht additiv. Technische Entwicklung baut, wie jede Evolution, auf sich selbst auf – und sie wird sich weiter beschleunigen, wenn die Technik in Epoche fünf ihren eigenen Fortschritt selbst in die Hand nimmt.¹¹

Das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs lässt sich also folgendermaßen zusammenfassen:

- Evolution beruht auf einem Rückkopplungseffekt: Die neuen Methoden einer Evolutionsstufe dienen dazu, die nächste Stufe zu erreichen – die Produkte von Entwicklungsabschnitten bauen aufeinander auf, wie im vorigen Kapitel beschrieben. Evolution verläuft – anders gesagt – über Vermittlungsstufen: Die natürliche Auslese schuf den Menschen, der Mensch erschuf die Technik, Mensch und Technik arbeiteten nun zusammen an der nächsten

technologischen Generation. In der Singularität wird zwischen Mensch und Technik keine Trennung mehr bestehen – *nicht weil Menschen zu Maschinen werden, sondern weil Maschinen wie Menschen (und noch viel mehr) werden*. Technik wird unser (metaphorischer) opponierbarer Daumen, der uns den nächsten Evolutionssprung ermöglicht. Fortschritt (Zunahme von Ordnung) beruht dann auf Denkprozessen in Lichtgeschwindigkeit, anstatt auf langsamen elektrochemischen Reaktionen. Jede Evolutionsstufe baut auf den Früchten der jeweils vorherigen Stufe auf, darum ist die Fortschrittsrate mindestens exponentiell. Die Ordnung (das Maß, in dem Informationen einem bestimmten Zweck – zum Beispiel dem Überleben – dienen) von Evolutionsprozessen nimmt mit der Zeit zu.

- Ein evolutionärer Prozess ist kein geschlossenes System; Evolution bezieht ihre Vielfalt aus dem Chaos, das sie umgibt. Da die durch die Evolution erzeugte Ordnung zur Grundlage der Evolution selbst wird, wächst auch die Ordnung exponentiell.
- Entsprechend nehmen auch die „Evolutionserträge“ (Geschwindigkeit, Effizienz, Kostenwirksamkeit und das allgemeine „Potenzial“* des Prozesses) exponentiell zu. Dies verdeutlicht das Moore'sche Gesetz, dem zufolge jede Generation von Mikrochips (die derzeit im Zweijahrestakt erscheinen) zum gleichen Preis doppelt so viele (und schnellere) Transistoren enthält wie die vorige. Wie wir gesehen haben, betrifft die exponentielle Steigerung von Leistung und Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht nur Computer, sondern praktisch die gesamte Informationstechnik sowie die Gesamtmenge menschlichen Wissens (nach verschiedenen Maßstäben). „Informationstechnik“ bezeichnet hier eine wachsende Klasse von Erscheinungen und wird früher oder später jegliche wirtschaftliche und kulturelle Aktivität umfassen.
- Eine weitere Rückkopplung besteht darin, dass in einen Evolutionsprozess umso mehr Ressourcen gesteckt werden, je effektiver er wird. Daraus resultiert eine zweite Ebene exponentiellen Wachstums: Die Wachstumsrate selbst (der Exponent) wächst exponentiell. Wie im Diagramm „Das Moore'sche Gesetz: Das fünfte Paradigma“ auf Seite 66 zu sehen ist, dauerte es zu Beginn des 20. Jahrhunderts drei Jahre, das Preis-

Leistungs-Verhältnis von Computern zu verdoppeln. Zur Jahrhundertmitte waren es nur noch zwei Jahre, heute noch etwa ein Jahr. Und nicht nur die Rechenleistung verdoppelt sich jährlich, die Anzahl hergestellter Mikrochips wächst ebenfalls exponentiell – und dementsprechend steigen wiederum die Forschungsetats.

- Natürliche Evolution ist der Hauptvertreter solcher Prozesse. Da sie in einem komplett offenen System stattfand (im Gegensatz zu einem künstlich eingeschränkten evolutionären Algorithmus), konnten dabei Entwicklungen auf vielen Ebenen simultan ablaufen. So entwickelte sich nicht nur das Erbgut der einzelnen Spezies weiter, sondern der gesamte genetische Apparat. Nicht nur die Gene veränderten sich mit der Zeit, sondern auch die Anzahl der Chromosomen, auf die sie verteilt sind. Außerdem fand die Evolution Mittel, um den genetischen Code vor zu großen Abweichungen zu schützen. (Kleinere Mutationen bleiben jedoch erlaubt, um weitere Verbesserungen zu ermöglichen). Eines dieser Mittel ist die doppelte Speicherung der Informationen in Chromosomenpaaren. Sollte ein Gen auf einem Chromosom beschädigt sein, so besteht immer noch eine intakte Kopie auf dem anderen. Selbst das ungepaarte männliche Y-Chromosom hat Backup-Methoden: Gensequenzen werden schlichtweg innerhalb des Chromosoms wiederholt.¹² Nur etwa zwei Prozent des Genoms kodieren Proteine.¹³ Der Rest der genetischen Substanz kontrolliert mittels – weitgehend unerforschter ausgefeilter Mechanismen, wann und wie die Gene exprimiert (das heißt, in Proteine übersetzt) werden. Hinsichtlich dieser Methoden (oder beispielsweise der Mutationsrate) hat sich also der Evolutionsvorgang selbst weiterentwickelt.
- Technische Evolution ist auch ein solcher Prozess. Er begann mit den technischen Kreationen der ersten Spezies, die zu solchen in der Lage war, und ist somit Ableger – und Fortsetzung – der natürlichen Evolution. *Homo sapiens* entwickelte sich über ein paar hunderttausend Jahre, und seine ersten Schritte auf dem Gebiet der Technik (etwa Rad, Feuer und Faustkeil) erfolgten nicht viel schneller, sondern brauchten viele zehntausend Jahre um sich zu verbreiten. Der Buchdruck dagegen setzte sich vor einem halben Jahrtausend innerhalb von nur hundert Jahren durch. Heutzutage

verbreiten sich große Paradigmenwechsel, in Form von neuen Produkten wie Handys oder dem Internet, in nur wenigen Jahren.

- Ein bestimmtes Paradigma (ein Lösungsansatz oder eine Methode; beispielsweise das Verkleinern von Transistoren auf Mikrochips, um schnellere Rechner zu bauen) sorgt solange für exponentielles Wachstum, bis das Potenzial der Idee erschöpft ist. Wenn dieser Fall eintritt, muss ein Paradigmenwechsel stattfinden, damit das Wachstum weitergehen kann.

Der Lebenszyklus eines Paradigmas. Jedes Paradigma durchläuft drei Phasen:

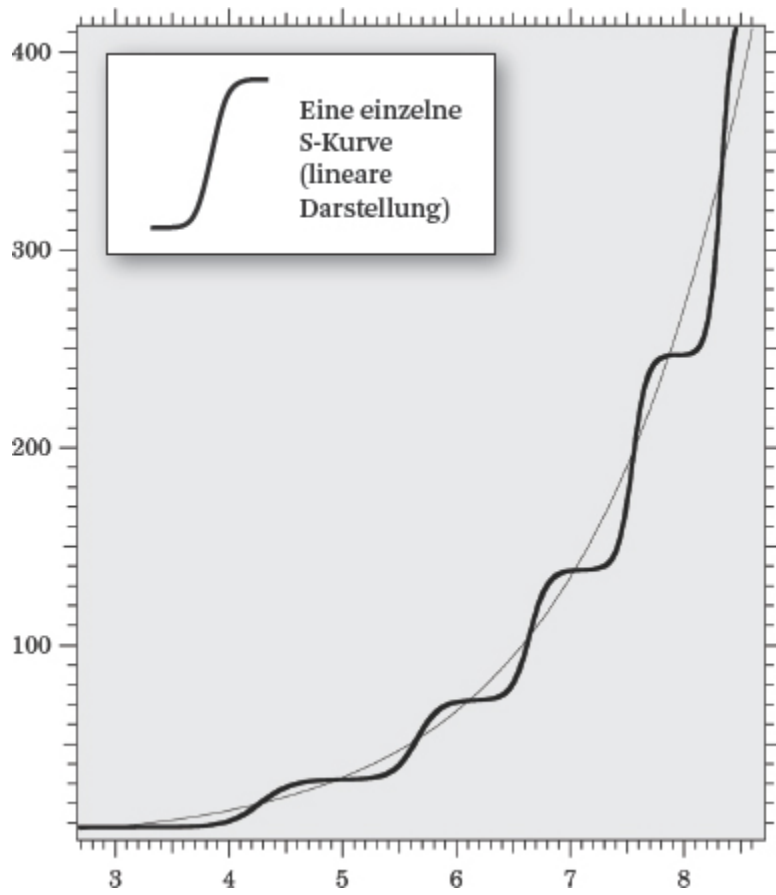
1. Langsames Wachstum (frühe exponentielle Phase).
2. Schnelles Wachstum (späte, explosive exponentielle Phase).
3. Abflachen und Stagnieren, wenn das Paradigma ausgereift ist.

Die Kurve über alle drei Phasen sieht aus wie ein nach rechts ausgestrecktes „S“. Die Skizze auf der folgenden Seite zeigt, wie sich aus einer Reihe von S-Kurven eine kontinuierliche exponentielle Entwicklung ergibt: Jede neue S-Kurve ist schmaler (braucht weniger Zeit) und höher (leistet mehr) als die vorherige.

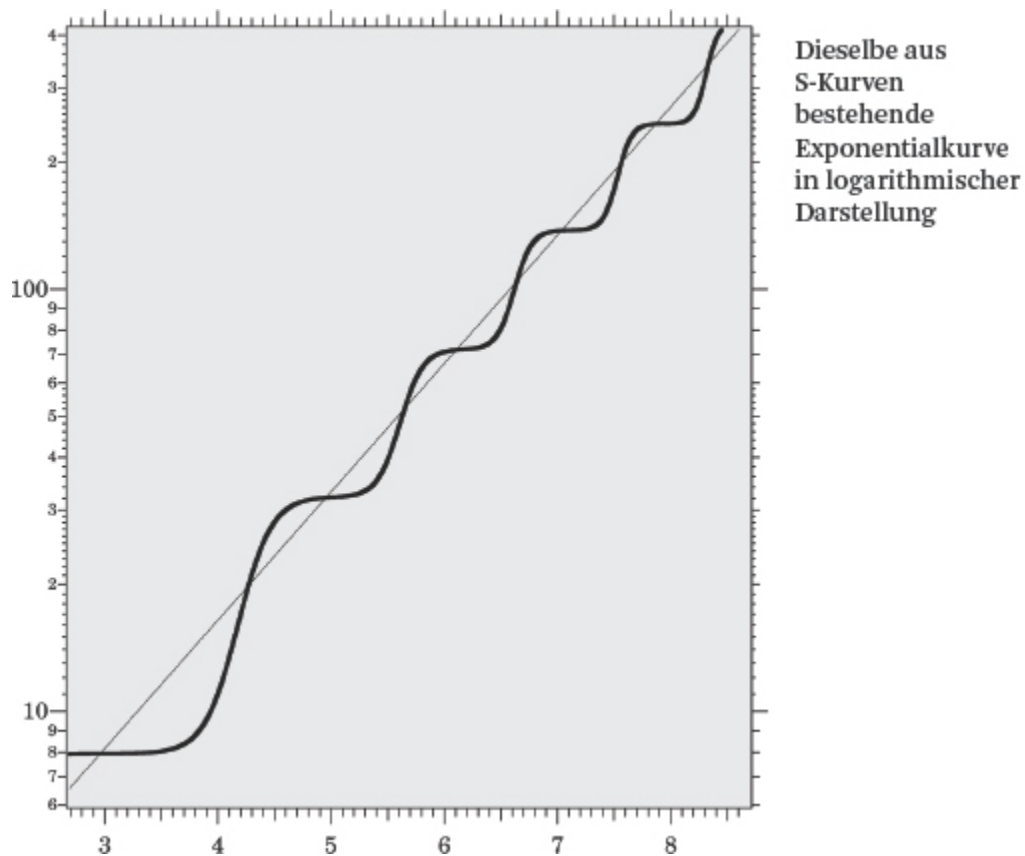
S-Kurven sind typisch für biologisches Wachstum: Sie entstehen durch Replikation eines Systems konstanter Komplexität (etwa einer bestimmte Tierart) in einer bestimmten ökologischen Nische mit beschränkten Ressourcen. Wenn sich beispielsweise eine Spezies in einem neuen, wirtlichen Territorium ansiedelt, wächst die Population eine Zeit lang exponentiell und pendelt sich dann bei einer bestimmten Größe ein. Das übergeordnete exponentielle Wachstum evolutionärer Prozesse (ob molekular, biologisch, kulturell oder technisch) übersteigt jedoch alle Wachstumsschranken der einzelnen, ihm zugrunde liegenden Paradigmen, und verknüpft mehrere S-Kurven. Das heute wichtigste Beispiel für dieses Phänomen sind die (weiter unten beschriebenen) fünf Paradigmen der Rechnertechnik. Aber auch die gesamte, im letzten Kapitel besprochene evolutionäre Entwicklung setzt sich aus aufeinanderfolgenden S-Kurven zusammen. Jedes der Schlüsselereignisse (Schrift, Buchdruck, etc.) ist ein neues Paradigma mit einer eigenen S-Kurve.

Laut der Theorie des Punktualismus wechseln sich in der natürlichen Evolution plötzliche, rasche Veränderungen mit längeren Phasen relativer Stagnation ab.¹⁴ Genau genommen sind die Schlüsselereignisse in unseren Diagrammen eigentlich Phasen der exponentiellen Zunahme von Ordnung (und meist auch der Komplexität) – stets gefolgt von einer Verlangsamung, die eintritt, sowie das jeweilige Paradigma sich seiner Asymptote (der Wachstumsgrenze) annähert. Punktualismus beschreibt Evolution also besser als ein Modell, das eine durchgehend gleichförmige Entwicklung annimmt.

Die punktualistischen Schlüsselereignisse führen zwar zu schnellen Veränderungen, aber es handelt sich nicht um plötzliche Sprünge. Die Entstehung der DNS löste eine Welle evolutionärer Verbesserung und zunehmender Komplexität aus – jedoch keinen unmittelbaren Sprung. Die Welle, die durch die Erfindung des Computers ausgelöst wurde, hält bis heute an: Die durch unsere Zivilisation beherrschbare Informationskomplexität wird immer größer. Diese Welle wird auch nicht abebben, bevor alle, uns physikalisch erreichbare Materie und Energie mit Information erfüllt ist (siehe den Abschnitt „...für das kosmische Schicksal“ in **Kapitel 6**).¹⁵



Kontinuierliche
Exponentialkurve
durch
Aneinander-
reihung von
S-Kurven (lineare
Darstellung)



In der dritten Phase (der Reifephase) im Lebenszyklus eines Paradigmas baut sich ein gewisser Druck auf, in Richtung eines Paradigmenwechsels. Im Fall der Technik heißt das, dass vermehrt Forschungsgelder in die Entwicklung des nächsten Paradigmas fließen. So wird zur Zeit bereits intensiv an dreidimensionalen Molekularchips geforscht, obwohl man die Transistoren auf flachen Halbleiterchips noch mindestens ein Jahrzehnt lang weiter verkleinern kann.

Wenn ein technisches Paradigma sich seiner Asymptote nähert, ist das nächste Paradigma in der Regel in Spezialbereichen schon im Einsatz. In den 1950ern bauten Computerhersteller immer kleinere Elektronenröhren, um das Preis-Leistungs-Verhältnis zu drücken. Als dies nicht weiter möglich war, etwa 1960, hatten Transistoren in tragbaren Radios bereits ein beträchtliches Marktsegment erobert und waren nun bereit, auch in der Rechnertechnik an die Stelle der Röhren zu treten.

Die Ressourcen der Evolution sind relativ unbegrenzt. Eine solche Ressource ist die (ständig zunehmende) Ordnung. (Wie wir gesehen haben,

steigt die Ordnung der Produkte immer weiter an). Jede Stufe schafft mächtigere Werkzeuge für die nächste Stufe: Die DNS ermöglichte bessere und schnellere evolutionäre „Experimente“; computergestützte Entwicklung ermöglicht, rasch die nächste Computergeneration auf den Markt zu bringen.

Die andere wichtige Ressource der Evolution ist das „Chaos“ in ihrer Umgebung. Das Chaos liefert die Vielfältigkeit, in der die Evolution leistungsfähigere und effizientere Lösungen findet. Eine Quelle der Diversität in der biologischen Entwicklung ist die Durchmischung und Neukombinationen von Genen durch sexuelle Reproduktion. Sexuelle Reproduktion an sich ist wiederum eine Erfindung der Evolution, die schnellere Anpassung und größere genetische Vielfalt ermöglicht. Andere Quellen der Vielfalt sind Mutationen und Umweltveränderungen. In der technischen Evolution sind es menschlicher Einfallsreichtum und wechselnde Marktbedingungen, die Treibstoff für Innovationen liefern.

Fraktal-Baupläne. Eine entscheidende Frage bezüglich des Informationsgehalts biologischer Systeme lautet: Wie kann eine verhältnismäßig geringe Menge genetischer Informationen ein so komplexes System wie den Menschen beschreiben? Die Antwort wird klar, wenn man sich die biologischen Baupläne als „probabilistische Fraktale“ vorstellt. Ein Fraktal ist ein Konstruktionsverfahren, bei dem jede Komponente („Initiator“) eines bestimmten Ausgangskomplexes jeweils durch eine Gruppe neuer Komponenten („Generator“) ersetzt wird. Im nächsten Konstruktionsschritt dienen dann die einzelnen Komponenten jedes Generators als Initiatoren und werden wiederum jeweils durch einen Generator ersetzt. Dieser Prozess wird viele Male wiederholt – jedes Mal werden die Bestandteile von Generatoren zu Initiatoren neuer Generatoren. Jede weitere Iteration steigert scheinbar die Komplexität, erfordert jedoch keinerlei zusätzliche Informationen.

Ein probabilistisches Fraktal erweitert dieses Prinzip um das Element des Zufalls. Während gewöhnliche (deterministische) Fraktale genau vorherbestimmt sind, sind sich die Erzeugnisse eines probabilistischen Fraktals zwar ähnlich, aber immer ein bisschen anders. Jede Komponente

eines probabilistischen Fraktals wird nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit kleiner 1 eingefügt. Die resultierenden Gebilde wirken dadurch natürlicher und lebendiger. Probabilistische Fraktale werden daher von Grafikprogrammen verwendet, um realistische Bilder von Bergen, Wolken, Küsten, Laubwerk und anderen Naturmotiven zu erstellen. Sie erzeugen eine große Menge vermeintlicher Komplexität und viel Variation im Detail anhand einer sehr kompakten Konstruktionsbeschreibung. Genau dieses Prinzip kommt auch in der Natur zum Einsatz: Gene beschreiben den prinzipiellen Aufbau, aber der fertige Organismus ist sehr viel detailreicher als sein genetischer Bauplan.

Der Detailreichtum biologischer Systeme wird häufig falsch bewertet – beispielsweise, wenn behauptet wird, die Feinstrukturen des Gehirns seien bis in die letzte Faser genau abgestimmt und würden anders nicht funktionieren. Um die Funktion eines Systems wie dem Gehirn zu verstehen, müssen wir uns mit dem Konstruktionsprinzip vertraut machen – und dieses Prinzip ist sehr viel schlichter als die detailreiche, fraktalartige Gehirnstruktur, die in einem iterativen Prozess aus der genetischen Information hervorgeht. Das menschliche Genom enthält etwa achthundert Millionen Bytes Information. Komprimiert sind es nur noch etwa dreißig bis hundert Millionen. Das ist ungefähr hundert Millionen Mal weniger Information, als all die Neuronenverbindungen und Neurotransmitterkonzentrationen eines ausgewachsenen menschlichen Gehirns ausmachen.

Nun wollen wir sehen, inwiefern die in **Kapitel 1** beschriebenen Entwicklungsabschnitte dem Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs entsprechen: Das grundlegende Paradigma der Biologie besteht in der Verkettung von Aminosäuren zu Proteinen und von Nukleinsäuren zu RNS-Strängen. Selbstreplizierende RNS (und später DNS) ermöglichte die digitale Aufzeichnung der Ergebnisse der evolutionären Experimente. Später (in Epoche drei) brachte die Evolution eine Spezies hervor, die, mit rationalem Denken und einem opponierbaren Glied (dem Daumen) ausgerüstet, eine Verschiebung von der Biologie zur Technik verursachte (Epoche vier). Der nächste große Paradigmenwechsel wird die Verschiebung von natürlichem Denken zu einer Mischform von

biologischer und nichtbiologischer Denkkraft (Epoche fünf). Eine Rolle spielen dabei auch „biologisch inspirierte“ Prozesse, also das Reverse Engineering natürlicher Gehirne.

Wenn wir die Dauer dieser Epochen betrachten, so erkennen wir, dass sie Teil eines kontinuierlich beschleunigenden Vorgangs sind. Die Entwicklung erster Lebensformen (primitive Zellen, DNS) dauerte Milliarden von Jahren, danach ging alles immer schneller. Während der Kambrischen Explosion verstrichen zwischen größeren Paradigmenwechseln nur noch einige zehn Millionen Jahre. Später entwickelten sich Menschenaffen innerhalb einiger Millionen Jahre und *Homo sapiens* in nur ein paar hunderttausend Jahren. Nach dem Auftreten einer technikschaftenden Spezies konnte DNS-gesteuerte Protein-Synthese allein die exponentielle Fortschrittsrate nicht mehr aufrechterhalten, und die Evolution ging in Form von menschengemachter Technik weiter. Das heißt nicht, dass keine biologische (genetische) Evolution mehr stattfindet, sondern lediglich, dass sie nicht mehr das Tempo bestimmt, in dem die Ordnung (beziehungsweise die Effektivität und Effizienz von Berechnung*) zunimmt.¹⁶

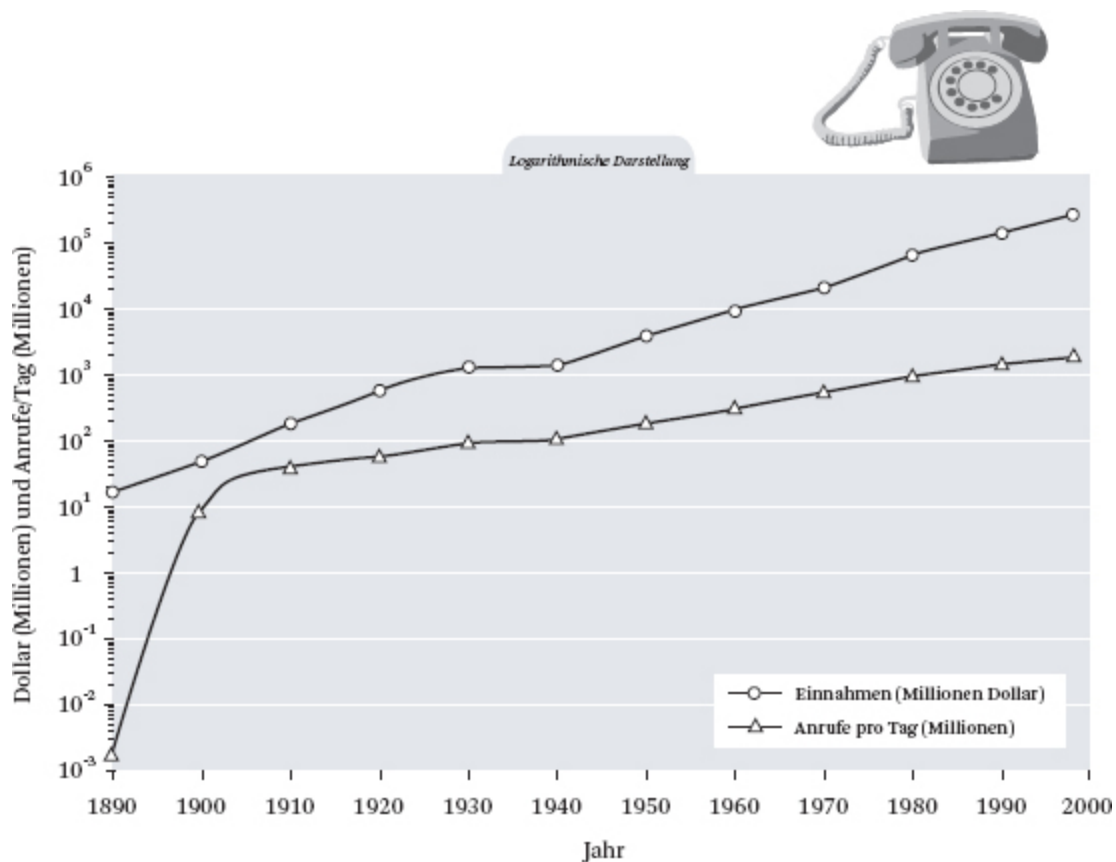
Weitsichtige Evolution. Die Zunahme von Ordnung und Komplexität im Laufe der Evolution hat viele praktische Auswirkungen – beispielsweise auf den Wahrnehmungsradius. Die ersten Lebensformen registrierten Vorgänge in wenigen Millimetern Entfernung anhand von chemischen Veränderungen. Sehbegabte Tiere konnten Ereignisse über mehrere Kilometer beobachten. Seit der Erfindung des Teleskops blicken Menschen in Millionen von Lichtjahren entfernte Galaxien und entdeckten andererseits durch das Mikroskop die Welt der Zellstrukturen. Mithilfe der neuesten Technik sehen wir heute bis an den Rand des sichtbaren Universums und bis auf die Ebene subatomarer Quantenteilchen.

Auch die Wirkungsdauer der Beobachtungen veränderte sich: Einzeller erinnerten sich an äußere Reize nur in Form von wenige Sekunden andauernden chemischen Reaktionen. Erst Tiere mit Gehirnen speicherten Gesehenes über mehrere Tage. Primaten entwickelten erste Ansätze von Kultur und gaben Informationen über mehrere Generationen weiter. In

frühen Zivilisationen hielten sich mündliche Überlieferungen über Hunderte von Jahren, mit der Verbreitung der Schrift wurden daraus Tausende.

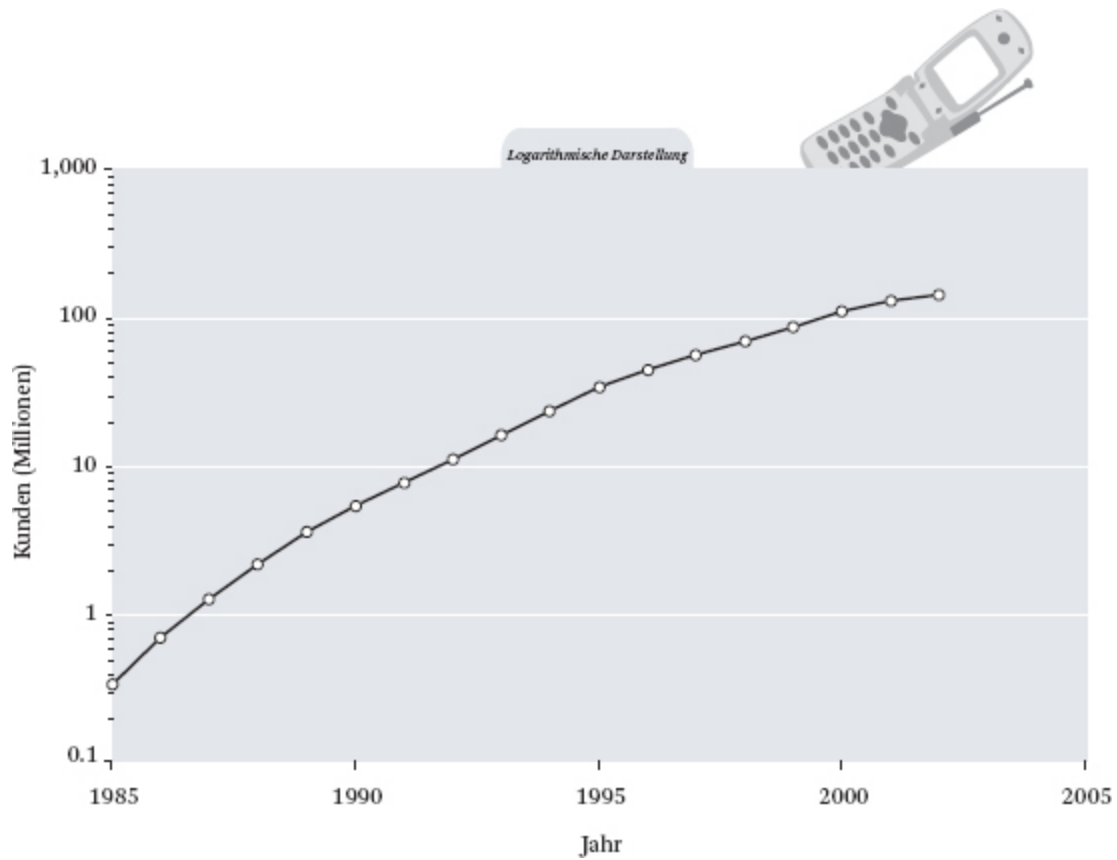
Ein weiteres Beispiel für die Vergrößerung von Reichweite und die Beschleunigung der Paradigmenwechselrate ist die Evolution der modernen Kommunikation. Es dauerte etwa ein halbes Jahrhundert, bis das Telefon in der breiten Bevölkerung Zuspruch fand (siehe untenstehende Abbildung).¹⁷

Wachstum der US-amerikanischen Telefonindustrie



Das Mobiltelefon setzte sich dagegen in einem einzigen Jahrzehnt durch.¹⁸

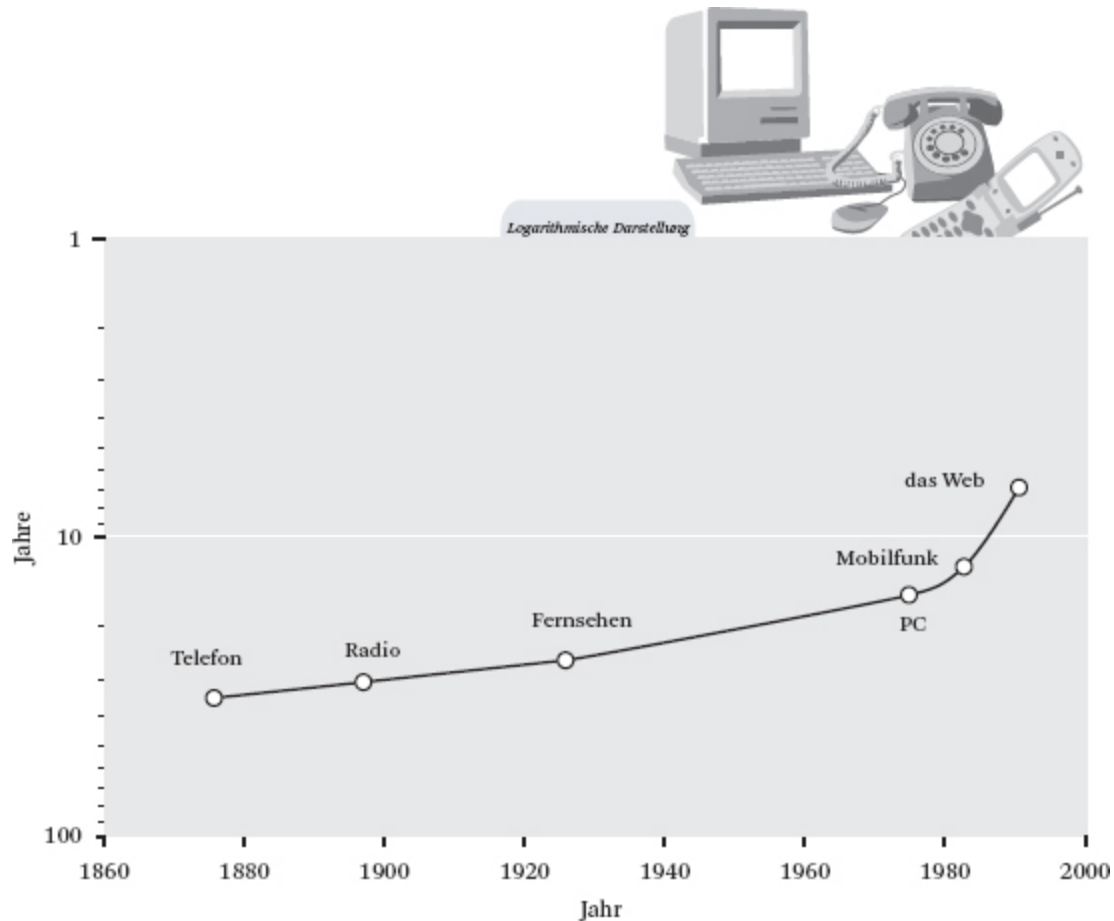
Geschätzte Anzahl US-amerikanischer Mobilfunkkunden



Allgemein verzeichnet die Kommunikationstechnik ein gleichmäßiges Wachstum über das letzte Jahrhundert.¹⁹

Dauer bis zur Verbreitung von Erfindungen

Jahre bis zur Anwendung durch einen Viertel der US-Bevölkerung



Wie im vorigen Kapitel besprochen, verdoppelt sich die Rate neuer technologischer Paradigmen derzeit alle zehn Jahre. Andersherum: Mit jedem neuen Jahrzehnt dauert das Aufkommen eines neuen Paradigmas nur noch halb so lang. Aufgrund dessen wird der technische Fortschritt im 21. Jahrhundert dem Fortschritt von zweihundert Jahrhunderten im Tempo des Jahres 2000 entsprechen.^{20, 21}

Die S-Kurve als technologischer Lebenszyklus

Eine Maschine ist in ebenso unverkennbarer, genialer und ausdrucksvoller Weise menschlich, wie eine Geigensonate oder ein euklidisches Theorem.

GREGORY VLASTOS

Es war ein weiter Weg vom still in seiner Klosterzelle kalligrafierenden Mönch bis zum munteren Dahinklickern moderner Schreibgeräte, welche innerhalb von einem Vierteljahrhundert das Geschäftsleben revolutioniert und reformiert haben.

SCIENTIFIC AMERICAN, 1905

keine Kommunikationstechnik ist je völlig verschwunden, aber jede einzelne verliert mit der Erweiterung des technologischen Horizontes zunehmend an Bedeutung.

ARTHUR C. CLARKE

Ich habe immer einen Stapel Bücher auf meinem Schreibtisch, in denen ich herumblättere, wenn mir die Ideen ausgehen, wenn ich ruhelos bin oder ein bisschen neue Inspiration brauche. Dabei fiel mir kürzlich ein neu erworbener, fatter Schmöcker in die Hände, und erfüllte mich mit Bewunderung für die Buchbindekunst: 470 fein bedruckte Seiten in 16-seitigen Lagen, mit dünnem, weißem Faden zusammengenäht und in den Buchblockrücken aus grauem Flachs geklebt. Die in Leinen gebundene, mit eingestanzten Goldlettern versehene Buchdecke ist über ein kunstvoll geprägtes Vorsatzpapier mit dem Buchblock verbunden. Das Ergebnis einer Technik, die bereits vor vielen Jahrzehnten Perfektion erreichte. Bücher sind ein so integraler Bestandteil unserer Gesellschaft – Spiegel und Schmiede unserer Kultur –, dass ein Leben ohne sie schwer vorstellbar ist. Doch der Buchdruck ist, wie jede Technik, nicht für die Ewigkeit.

Der Lebenszyklus einer Technik

Wir können den Lebenszyklus einer Technik in sieben Phasen unterteilen.

1. In der Vorlaufzeit stehen die Ausgangskomponenten einer Technik bereit, und manch einer träumt vielleicht bereits davon, die Teile zusammenzusetzen. Träumen ist jedoch nicht erfinden, selbst wenn man schwarz auf weiß träumt: Leonardo da Vinci zeichnete realistische Bilder von Flugzeugen und Automobilen, aber er gilt deswegen nicht als deren Erfinder.

2. Die nächste, viel gefeierte Phase ist die Erfindung: ein sehr kurzer Zeitabschnitt, gewissermaßen die Geburt nach langen Wehen. Der Erfinder vereint Neugierde, wissenschaftliche Fähigkeiten, Entschlossenheit und meist eine Portion Selbstdarstellung, und kombiniert vorhandene Methoden auf eine neue Weise, um eine neue Technik in die Welt zu setzen.
3. Nun folgt die Entwicklungsphase, während der die Erfindung von einigen begeisterten Paten (vielleicht auch dem Erfinder selbst) geschützt und unterstützt wird. Oft ist diese Phase wichtiger – und erfordert zuweilen weitere Kreationen, welche wichtiger sind – als die Erfindung selbst: Früh schon bauten findige Bastler in Handarbeit Fahrzeuge, die sich ohne Zugvieh bewegten. Doch erst Henry Fords Entwicklung der Massenproduktion verhalf dem Automobil zum Siegeszug.
4. Die vierte Phase heißt: Ausreifung. Die Technik entwickelt sich zwar immer noch weiter, jedoch führt sie nun gewissermaßen ein Eigenleben und ist ein fester Bestandteil der Gesellschaft. Sie ist nun so mit unserem täglichen Leben verflochten, dass der Eindruck entsteht, sie würde es für immer bleiben. Darum spielt sich ein spannendes Drama ab, sobald die nächste Phase eintritt, welche da lautet...
5. ...die Phase der unrechtmäßigen Thronanwärter. Ein Emporkömmling droht die altehrwürdige Technik zu verdrängen, deren Anhänger glauben jedoch an ihr Fortbestehen. Schnell kommen sie zu dem Ergebnis, dass die neue Technik zwar einige Vorteile bietet, dass es ihr jedoch genauer betrachtet an Qualität und bestimmten Funktionen gebricht. Falls nun tatsächlich die alte Ordnung erhalten bleibt, so nehmen Befürworter eines Technologie-Konservatismus dies sofort als Hinweis, dass die gute alte Methode ewig relevant bleibt.
6. Der Triumph der alternden Technik ist gewöhnlich von kurzer Dauer. Sie wird zumeist kurz darauf durch den Erfolg einer anderen technischen Neuerung obsolet. Diese Phase des Zyklus ist der Lebensabend, der allmähliche Niedergang der Technik, während ihr

ursprünglicher Sinn und Zweck von einem rüstigeren Konkurrenten erfüllt wird.

7. In der letzten Phase, die sich über 5 bis 10 Prozent des Lebenszyklus erstrecken kann, ist die Technik schließlich nur noch eine Antiquität (wie die Pferdekutsche, das Cembalo, die Schallplatte und die Schreibmaschine).

Mitte des 19. Jahrhunderts existierten mehrere Vorläufer des Phonographen, einschließlich des durch Léon Scott de Martinville konstruierten Phonautographen, einem Gerät zur grafischen Aufzeichnung von Geräuschen. Thomas Edison war jedoch derjenige, der die Puzzlestücke zusammenfügte und 1877 das erste Gerät erfand, mit dem man Ton sowohl aufzeichnen als auch wiedergeben konnte. Weitere Feinarbeit war nötig, bevor das Gerät kommerziell brauchbar wurde. Völlig ausgereift war die Technik erst, als Columbia 1949 die 33-rpm-Langspielplatte (LP) einführte und RCA Victor die 45-rpm-Platte.

Unrechtmäßiger Thronanwärter war die Kassette, die in den 1960ern aufkam und in den 1970er populär wurde. Sie war kleiner und überspielbar, weshalb eifrige Verfechter orakelten, sie würde bald die sperrigen und leicht verkratzten Platten ablösen. Doch abgesehen von diesen offensichtlichen Vorteilen musste man Kassetten ständig vor- und zurückspulen. Zudem haben auch sie ihre Anfälligkeiten für Störungen und Klangverfälschung.

Erst die Compact Disc (CD) versetzte den Todesstoß. CDs boten Direktzugriff und eine Klangqualität nahe an der menschlichen Hörschwelle, wodurch phonographische Tonträger schnell obsolet wurden. Obwohl noch immer Schallplatten gepresst werden, hat die Technik, die Edison vor 130 Jahren aus der Taufe hob, mittlerweile Antiquitätenstatus.

Ein anderes Beispiel ist das Klavier – eine technische Erfindung, in deren Neuauflage ich persönlich involviert war. Im frühen 18. Jahrhundert versuchte Bartolommeo Cristofori das Cembalo mit einem Anschlagsmechanismus zu versehen, der es dem Spieler erlaubte, die Lautstärke der Töne durch die Stärke des Tastendrucks zu bestimmen.

Die resultierende Erfindung des *gravicembalo col piano e forte* („Cembalo mit leise und laut“) war kein unmittelbarer Erfolg. Erst weitere Verbesserungen – wie Steins Wiener Mechanik und Zumpes Englische Mechanik – etablierten das „Piano“ als Hauptvertreter der Tasteninstrumente. Als ausgereift gilt das Klavier ab der Entwicklung des gusseisernen Rahmens, den Alpheus Babcock 1825 patentieren ließ. Danach folgten nur noch geringfügige Verbesserungen. Anfang der 1980er beanspruchte dann das elektrische Keyboard – erfolglos – den Thron des Klaviers. Es bot zahlreiche neue Funktionen: Im Gegensatz zum akustischen Klavier verfügten dessen elektronische Ableger über die Klänge dutzender Instrumente sowie Sequencer, die mit einem Tastendruck ganze Orchester erklingen lassen, über automatische Begleitung, Klavierspiel-Lernprogramme und dergleichen mehr. Das Einzige, was fehlte, war ein vernünftiger Klavierklang.

An diesem entscheidenden Mangel scheiterte die erste Generation elektrischer Klaviere, was zu der weitverbreiteten Annahme führte, es werde nie einen gleichwertigen elektronischen Ersatz geben. Doch der „Sieg“ des akustischen Klaviers wird nicht von Dauer sein. Aufgrund der breiteren Funktionalität und einem besseren Preis-Leistungs-Verhältnis übersteigen die Verkaufszahlen von elektronischen Klavieren für den Heimgebrauch längst die der akustischen. Der „Klavier“-Sound digitaler Klaviere ist nach Ansicht vieler mittlerweile vergleichbar oder sogar besser als der eines rein mechanischen Klaviers. Mit Ausnahme von Konzertflügeln (einem kleinen Marktsegment) ist der Verkauf von akustischen Klavieren längst rückläufig.

Vom Ziegenleder zum Download

In welchem Lebensabschnitt befindet sich also heute das Buch? Zu seinen Vorläufern gehören die mesopotamischen Tontafeln und die ägyptischen Papyrusrollen. Im alten Ägypten des 2. Jahrhunderts v. Chr. bauten die Ptolemäer die große Bibliothek von Alexandria und untersagten den Export von Papyrus, um jeglicher Konkurrenz vorzubeugen.

Die wahrscheinlich ersten richtigen Bücher, in Form von zwischen Holzdeckeln zusammengefügten Pergamentseiten aus Ziegen- und Schafhäuten, gehen zurück auf Eumenes II., dem altgriechischen Herrscher von Pergamon. Mithilfe dieser Technik stellte er seinerseits eine mit Alexandria vergleichbare Bibliothek zusammen. Etwa zeitgleich entwickelten auch die Chinesen primitive Bücher aus Bambusstreifen.

Die Ausreifung des Buchs verlief in drei großen Entwicklungsschüben. Der erste war die Drucktechnik – auch hier waren es die Chinesen, die im 8. Jahrhundert n. Chr. die ersten Versuche mit beschnitzten Holztafeln unternahmen. Durch den Buchdruck und der damit einhergehenden erhöhten Reproduzierbarkeit von Büchern erreichten diese auch Leser jenseits politischer und religiöser Herrscherkreise. Noch wichtiger aber war der zweite Entwicklungsschub: die Erfindung beweglicher Drucklettern*. Auch in diesem Bereich machten im 11. Jahrhundert wiederum die Chinesen (sowie auch die Koreaner) die ersten Experimente – jedoch mit mäßigem Erfolg, aufgrund der Komplexität der asiatischen Schrift. Johannes Gutenbergs Wirken im 15. Jahrhundert war nur möglich aufgrund der relativen Einfachheit des römischen Alphabets. 1455 druckte er die Bibel – das erste große Werk, das vollständig mit beweglichen Lettern gesetzt wurde.

Zwar durchlief die (elektro-)mechanische Drucktechnik eine kontinuierliche Evolution mit zahlreichen Verbesserungen, doch der dritte Entwicklungssprung kam erst mit der Computertechnik. Vor etwa zwei Jahrzehnten räumte computergesteuerte Schriftsetzung mit den beweglichen Lettern auf. Heute ist Typografie nur noch eine Sache der digitalen Bildbearbeitung.

Mit der Ausreifung des Buches vor zwanzig Jahren traten auch sogleich die ersten Thronerben auf: die erste Welle von „Digitalbüchern“ – wie üblich mit bestechenden qualitativen und quantitativen Vorteilen. Digitalbücher auf CD oder Speicherkarte bieten den Umfang tausender Bücher und noch dazu mächtige Such- und Navigationswerkzeuge. Man kann Netz-, CD- oder DVD-basierte Enzyklopädien in sekundenschneller nach Stichworten durchsuchen und

auch komplexe Suchanfragen mit logischen Regeln erstellen – was ich von meiner dreiunddreißigbändigen Printausgabe leider nicht behaupten kann. Digitalbücher können bewegte Bilder enthalten und auf unsere Eingaben reagieren. Ihre Seiten müssen nicht immer sequenziell geordnet sein, sondern können intuitive Querverbindungen enthalten.

Dieser ersten Generation von Thronanwärtern fehlte jedoch – genau wie bei Schallplatte und Klavier – eine entscheidende Charakteristik des Originals. In diesem Fall ist das die überragende Optik von Tinte auf Papier. Papier flackert nicht. Handelsübliche Bildschirme zeigen dagegen sechzig oder mehr Einzelbilder pro Sekunde. Das ist ein Problem für unser visuelles System: Wir sehen nur einen kleinen Teil unseres Gesichtsfeldes (der direkt durch die Fovea auf die Netzhaut projiziert wird) in hoher Auflösung. Dieser Bereich entspricht etwa der Fläche eines Wortes in 55cm Entfernung. Der Bereich jenseits der Fovea hat nur eine sehr geringe Auflösung, dafür aber exzellente Sensibilität für Helligkeitsänderungen, was unsere Vorfahren vor so manchen Raubtierattacken bewahrte. Unsere Augen nehmen darum das ständige Flackern eines VGA*-Bildschirms als Bewegung wahr, was ein ständiges Bewegen der Fovea zur Folge hat. Das führt zu einer Verringerung der Lesegeschwindigkeit – einer der Gründe, warum es unangenehm ist, am Bildschirm zu lesen. Mit Flachbildschirmen ist dieses Problem behoben, sie flackern nämlich nicht.

Weitere entscheidende Mängel sind jedoch Kontrast und Auflösung. Ein hochwertiges Buch weist einen Tinte-Papier-Kontrast von 120:1 auf, Bildschirme in der Regel gerade mal die Hälfte davon. Gedruckte Schrift und Illustrationen haben Auflösungen von 600 bis 1000 dpi**, Computerbildschirme kommen auf ein Zehntel dessen.

Was Größe und Gewicht betrifft, nähern sich moderne Computergeräte allmählich dem Buch an – mit einem Taschenbuch können sie es jedoch noch nicht aufnehmen. Und noch etwas: Papierbüchern geht der Strom nicht aus.

Am wichtigsten ist jedoch die Menge verfügbarer Software – in diesem Fall ist damit der bestehende, gewaltige Fundus gedruckter Bücher gemeint. Allein in den USA werden jedes Jahr fünfzigtausend

neue Bücher veröffentlicht, und viele Millionen sind bereits im Umlauf. Trotz ambitionierter Bemühungen, gedrucktes Material zu digitalisieren, wird es noch lange dauern, bis der elektronische Datenbestand eine vergleichbare Auswahl bietet. Das größte Hindernis sind dabei die (verständlichen) Bedenken der Verlage bezüglich der elektronischen Verbreitung von Büchern – angesichts der verheerenden Folgen illegalen Filesharings für die Musikindustrie.

Für jeden dieser Mangel wird es Lösungen geben. Neue, kostengünstige Darstellungstechniken sind dann in Sachen Kontrast, Auflösung, flackerfreies Bild und Sichtwinkel mit hochwertigen Papierdokumenten vergleichbar. Dank Brennstoffzelle läuft tragbare Elektronik bald Hunderte von Stunden mit einem einzigen Akku. Mobile Endgeräte sind mittlerweile klein und leicht wie Bücher. Die größte Herausforderung wird darin bestehen, einen sichereren Verbreitungsweg für Informationen zu finden. Das ist für alle Ebenen unserer Wirtschaft der entscheidende Punkt. Denn alles wird zu Information – einschließlich physikalischer Produkte, wenn in ungefähr 20 Jahren auf Nanotechnik basierende Herstellungsverfahren Realität werden.

Das Moore'sche Gesetz und mehr

Ein Rechenwerk des ENIAC enthält 18.000 Elektronenröhren und wiegt 30 Tonnen. Doch die Computer der Zukunft wiegen vielleicht nur noch 1,5 Tonnen bei 1.000 Röhren.

POPULAR MECHANICS, 1949

In der Informatik geht es genauso wenig um Computer, wie in der Astronomie um Teleskope.

E. W. DIJKSTRA

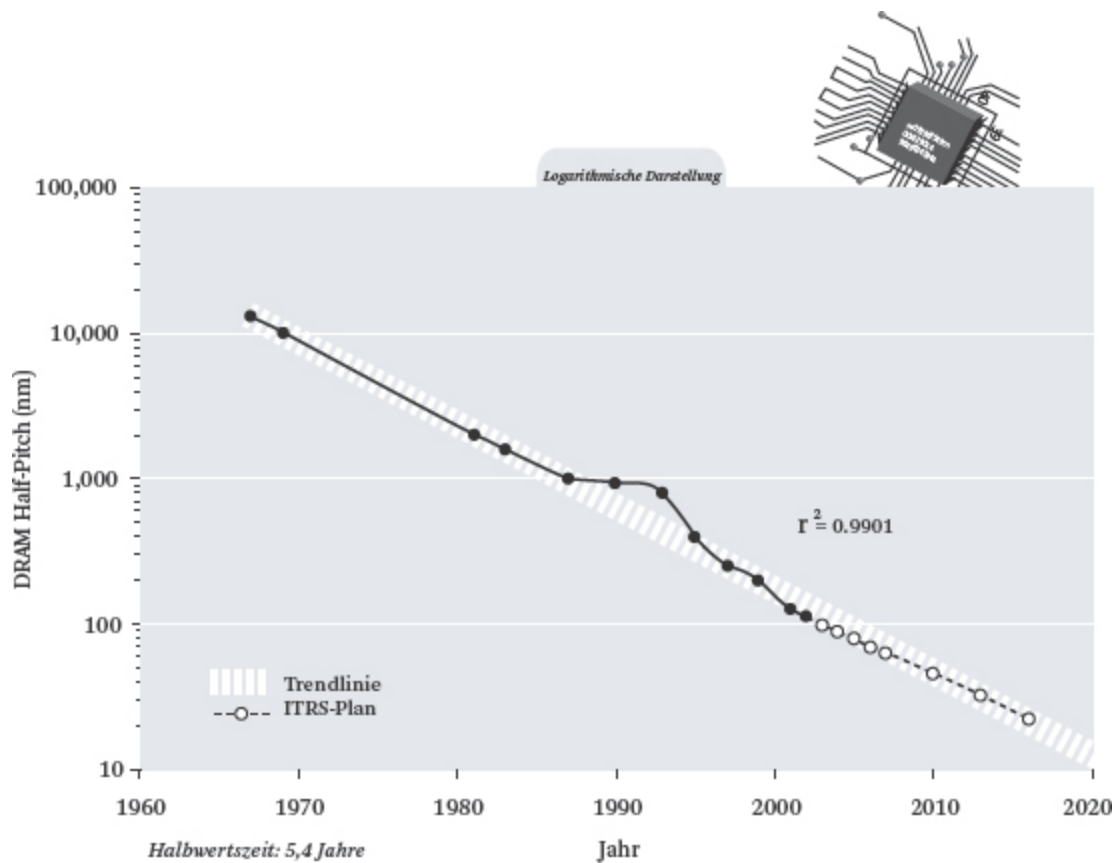
Bevor wir uns weiter mit der Singularität befassen, untersuchen wir noch das breite Spektrum an Techniken, die dem Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs unterworfen sind. Der berühmteste Exponentialtrend ist als das Moore'sche Gesetz bekannt geworden. Gordon Moore war ein führender Entwickler von Halbleiterchips und später Vorsitzender von Intel.

Mitte der 1970er stellte er fest, dass es alle vierundzwanzig Monate gelang, doppelt so viele Transistoren auf einen Chip zu quetschen. (Mitte der 1960er Jahre schätzte er noch, dass dies alle zwölf Monate möglich sein werde). Dass die Elektronen dadurch auch kürzere Wege zurücklegen, bedeutet einen weiteren Schub für die Rechenleistung. Das Resultat ist eine exponentielle Steigerung des Preis-Leistungs-Verhältnisses von Berechnung: Das Verhältnis verdoppelt sich einmal pro Jahr – was sehr viel schneller ist, als die besprochene Verdopplung der Häufigkeit von Paradigmenwechseln alle zehn Jahre. Auch für andere Größen der Informationstechnik, wie Bandbreite und Kapazität, beträgt die Verdopplungszeit etwa ein Jahr.

Die treibende Kraft hinter Moores Gesetz ist die Verkleinerung von Kleinststrukturen; deren Abmessungen halbieren sich in allen drei Dimensionen etwa alle 5,4 Jahre. (Siehe die Abbildung auf der folgenden Seite). Da Chips zweidimensional aufgebaut sind, verdoppelt sich die Anzahl von Komponenten pro Quadratmillimeter damit alle 2,7 Jahre.²²

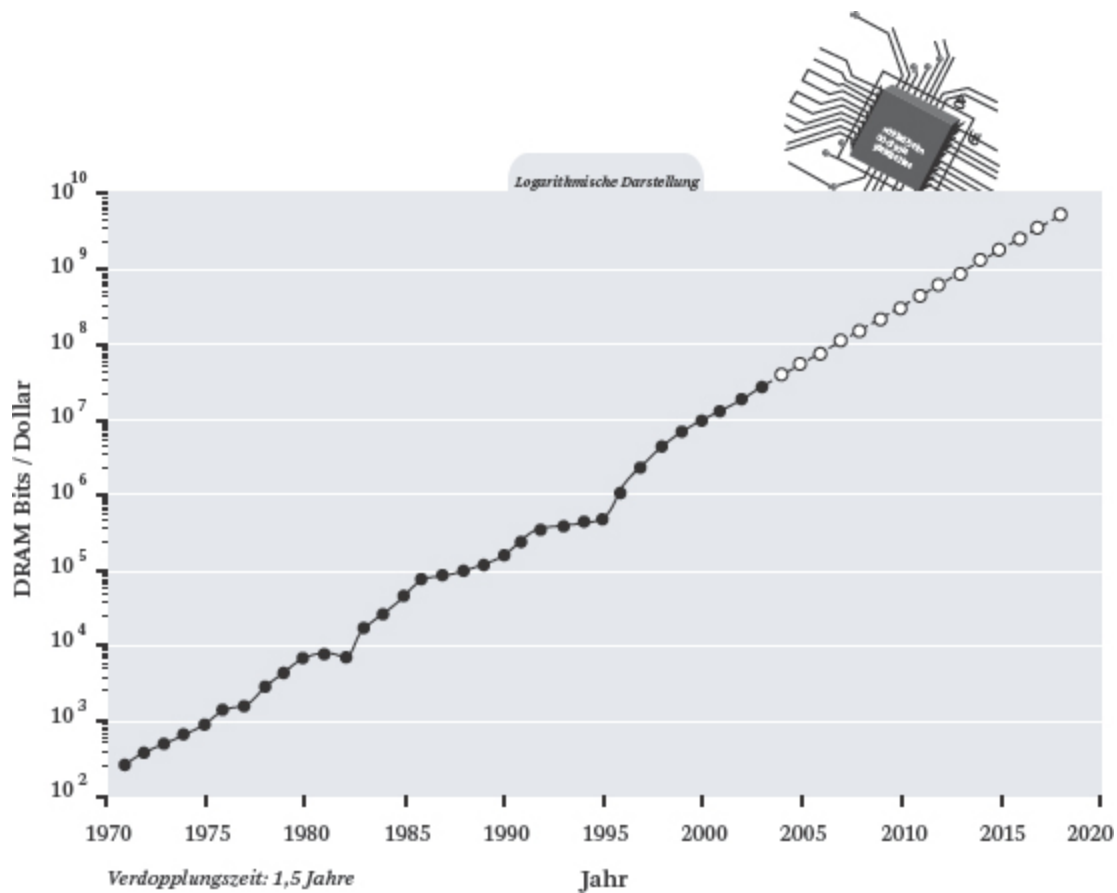
Die folgenden Diagramme verknüpfen historische Daten mit Entwicklungsplänen der Halbleiterindustrie bis 2018 (der International Technology Roadmap for Semiconductors [ITRS] von Sematech).

DRAM-Größe Kleinste Strukturgröße (sogenannter „Half-Pitch“)



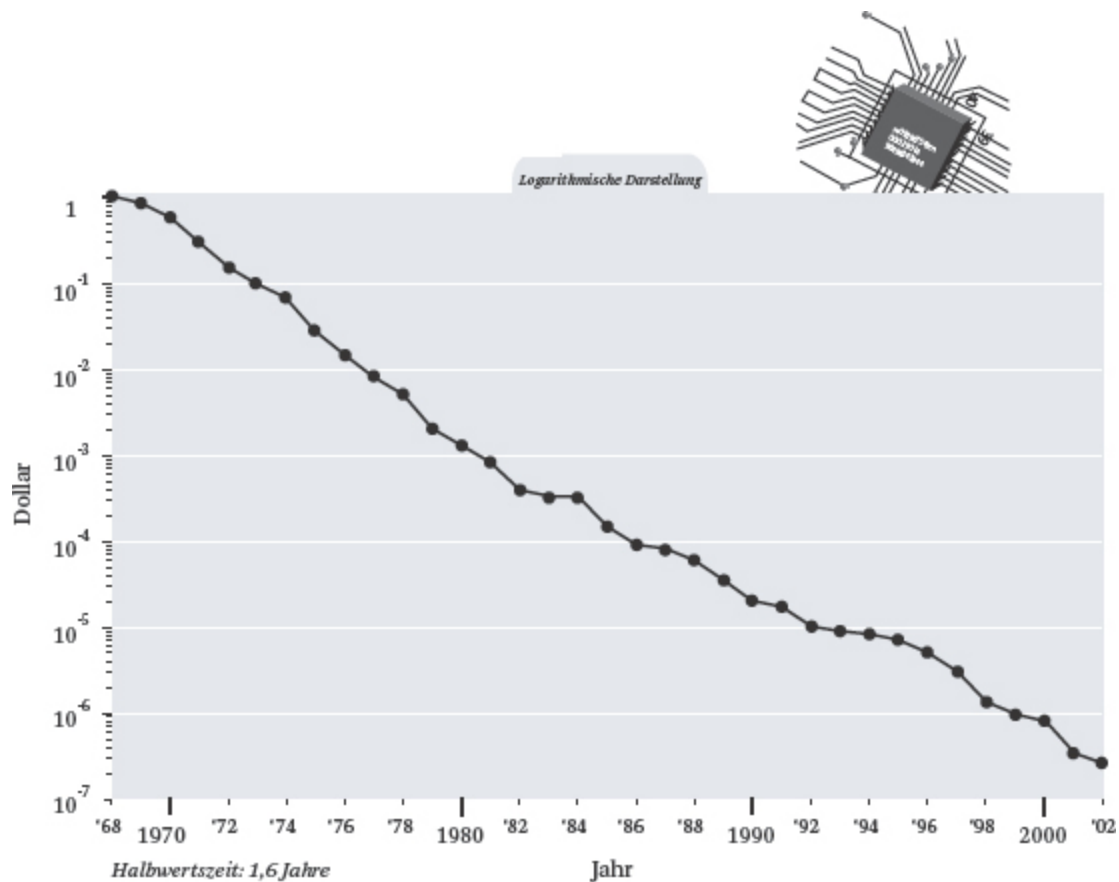
Der Preis pro Quadratmillimeter DRAM* hat ebenfalls abgenommen. Die Verdopplungszeit für DRAM-Bits pro Dollar beträgt gerade mal 1,5 Jahre.²³

DRAM-Preis Produktionskosten in Bits pro Dollar



Eine ähnliche Entwicklung sehen wir bei Transistoren. 1968 kostete ein Transistor einen Dollar; 2002 bekam man für einen Dollar etwa zehn Millionen Transistoren. Da DRAM ein Spezialgebiet ist, das von zusätzlichen Innovationen profitiert, liegt die Halbwertszeit von Transistorpreisen mit 1,6 Jahren etwas über der von DRAM (siehe untenstehende Abbildung).²⁴

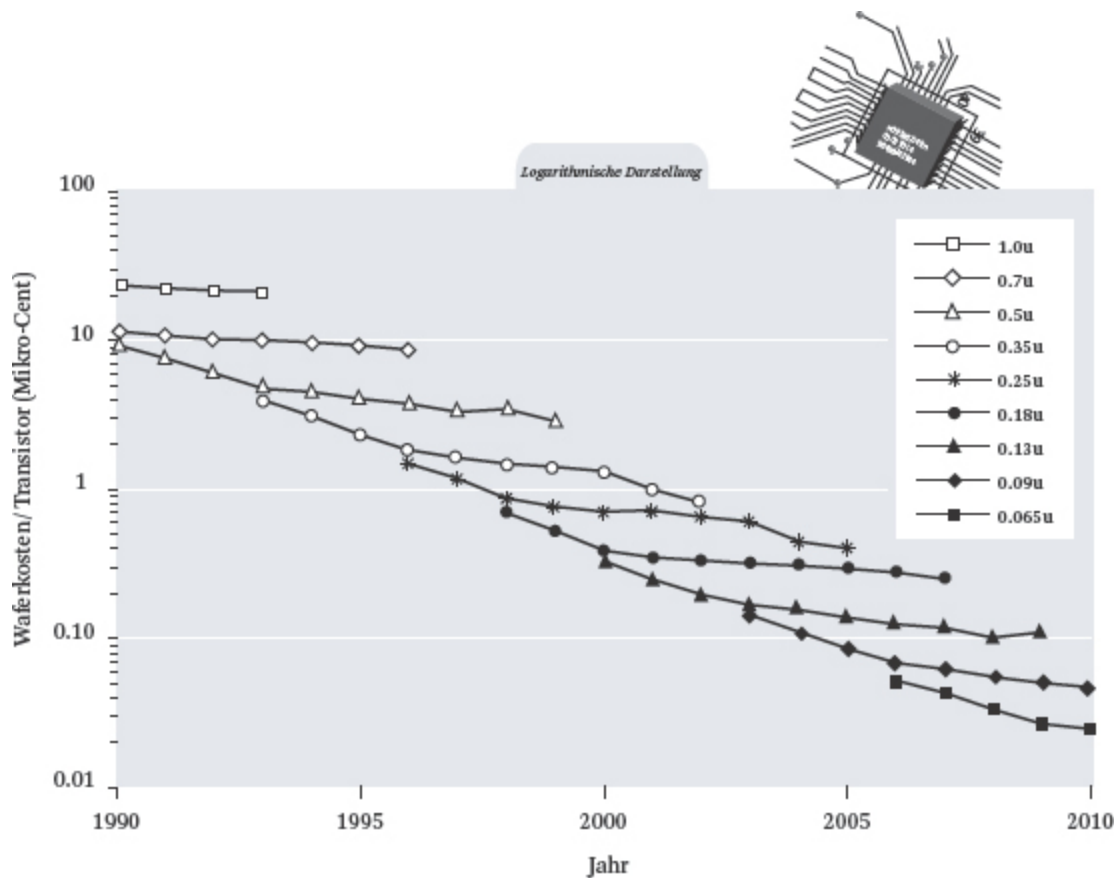
Durchschnittlicher Transistorpreis



Diese bemerkenswert gleichmäßig beschleunigende Preis-Leistungs-Entwicklung von Halbleitern verdankt sich der schrittweisen Verbesserung der Fertigungsverfahren (gemessen an der Strukturgröße*), die in immer kleinere Dimensionen vordringen. Die Strukturgröße unterschreitet derzeit erstmals die „Schwelle zur Nanotechnik“ von 100 Nanometern.²⁵

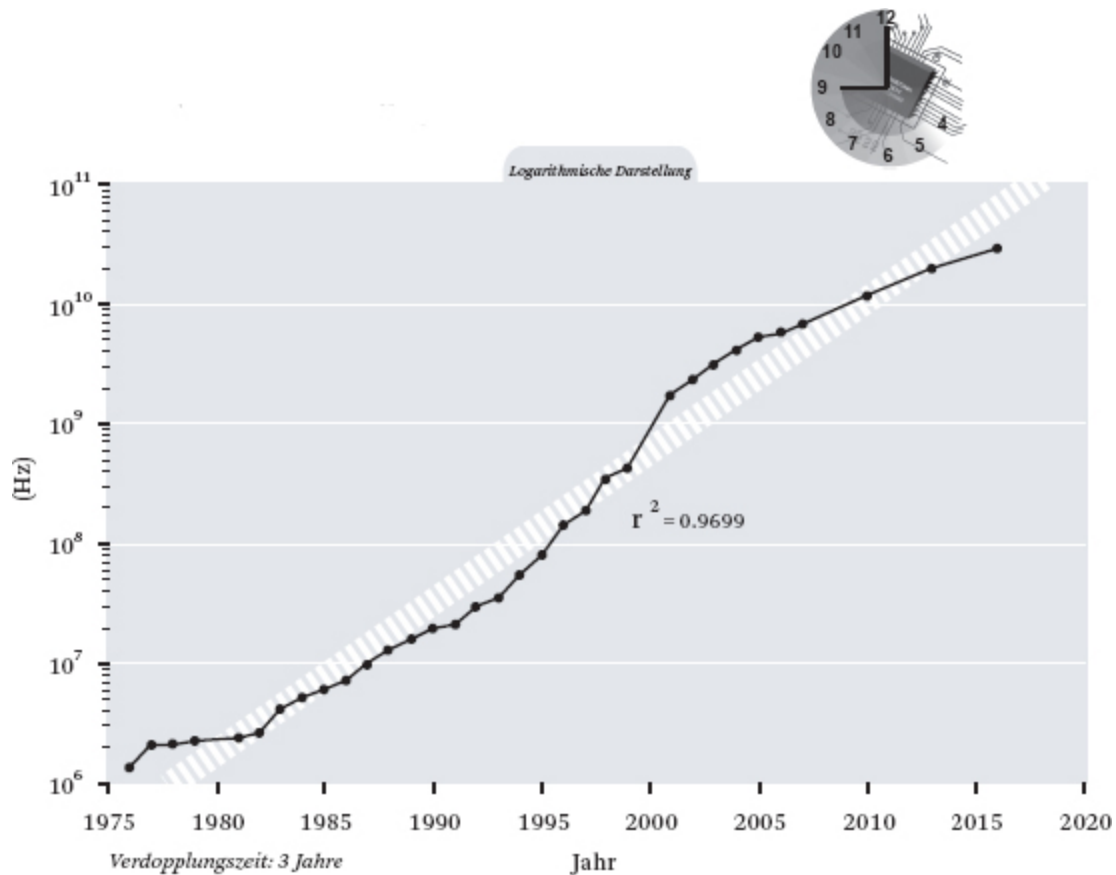
w093987549m 00-02 9014 98498243944

Transistorfertigung Sinkende Kosten



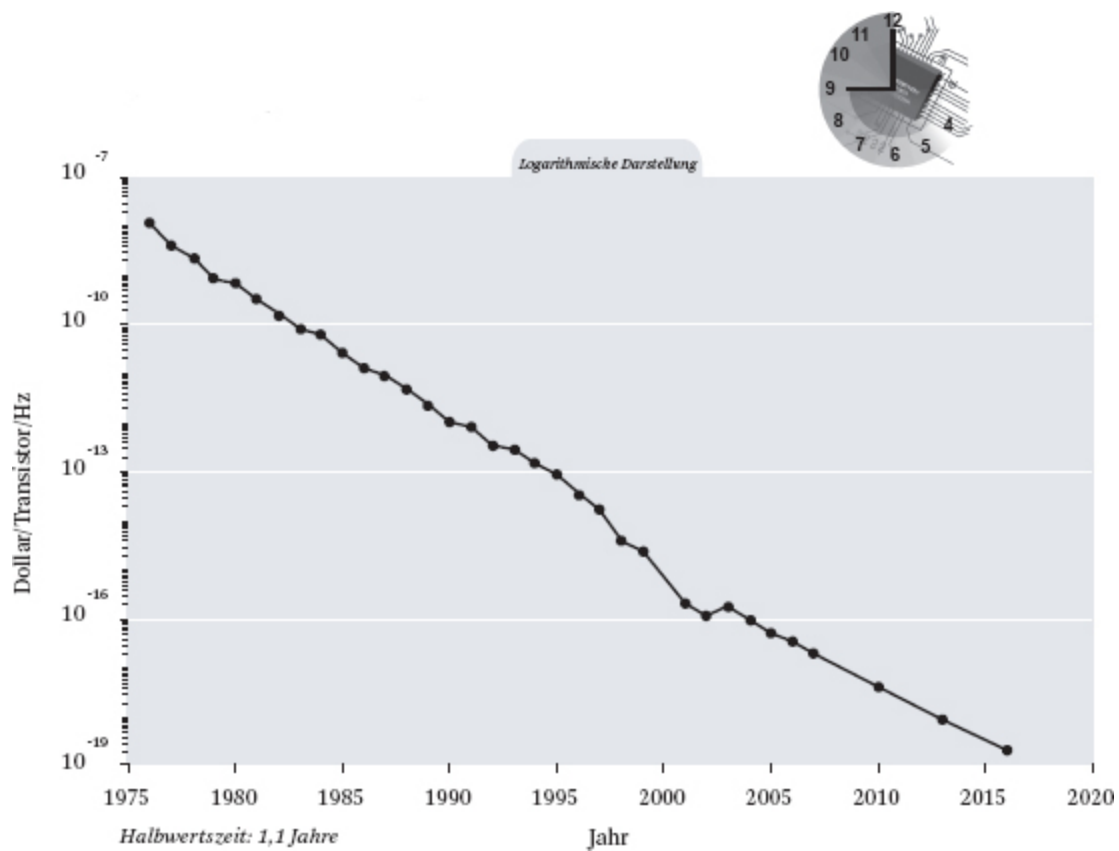
Gertrude Steins Rose ist eine Rose ist eine Rose.* Ein Transistor hingegen ist und bleibt nicht immer ein Transistor: Sie schrumpfen nicht nur in Preis und Größe, sondern sind über die letzten dreißig Jahre auch etwa eintausend Mal schneller geworden (siehe untenstehende Abbildung), da – wie schon erwähnt – die Übertragungswege kürzer werden.²⁶

Taktfrequenz von Mikroprozessoren



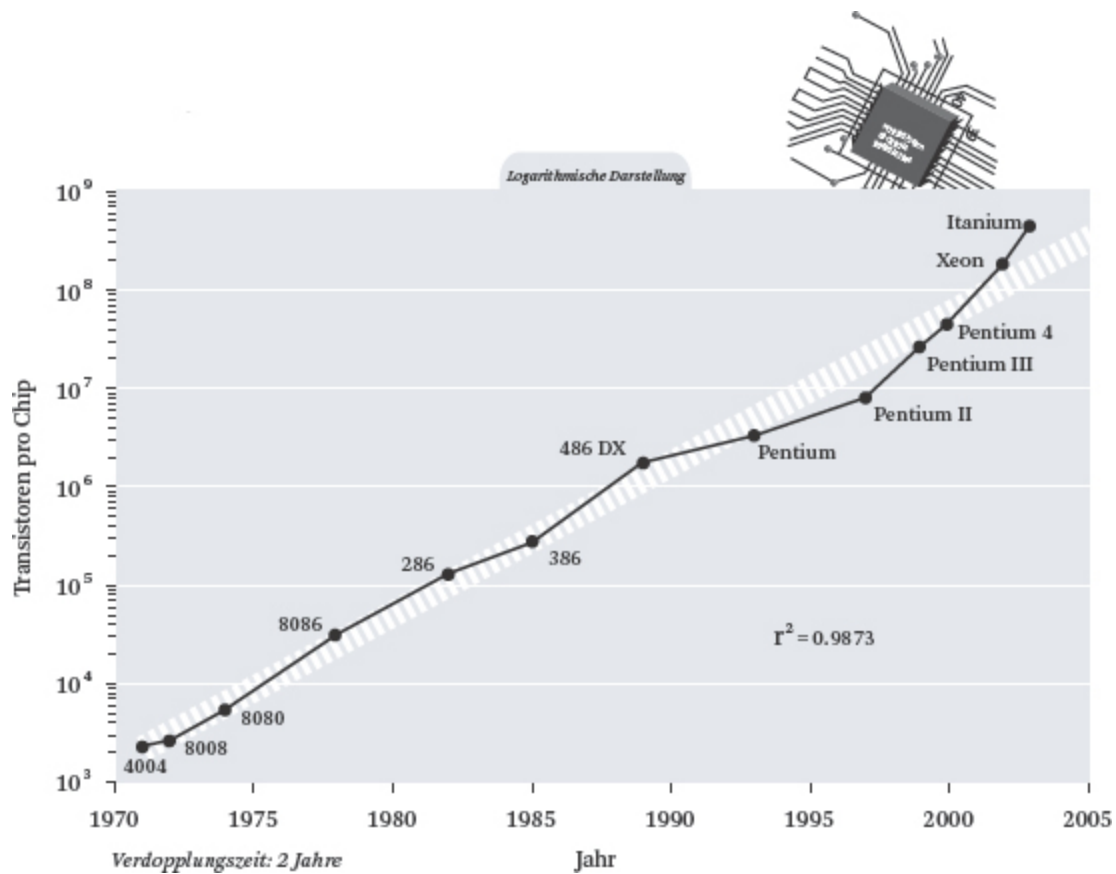
Nimmt man diese letzten beiden Exponentialtrends (Vergünstigung von Transistoren und Zunahme der Taktfrequenz) zusammen, so ergibt sich für die Kosten pro Transistorhertz* eine Halbwertszeit von nur 1,1 Jahren (siehe untenstehende Abbildung)²⁷. Dieser Maßstab ist aussagekräftiger, weil er Rechengeschwindigkeit und -kapazität gleichermaßen beinhaltet – nach wie vor unberücksichtigt bleiben Effizienzsteigerungen auf höheren Ebenen der Prozessorarchitektur.

Mikroprozessorpreis pro Taktzyklus



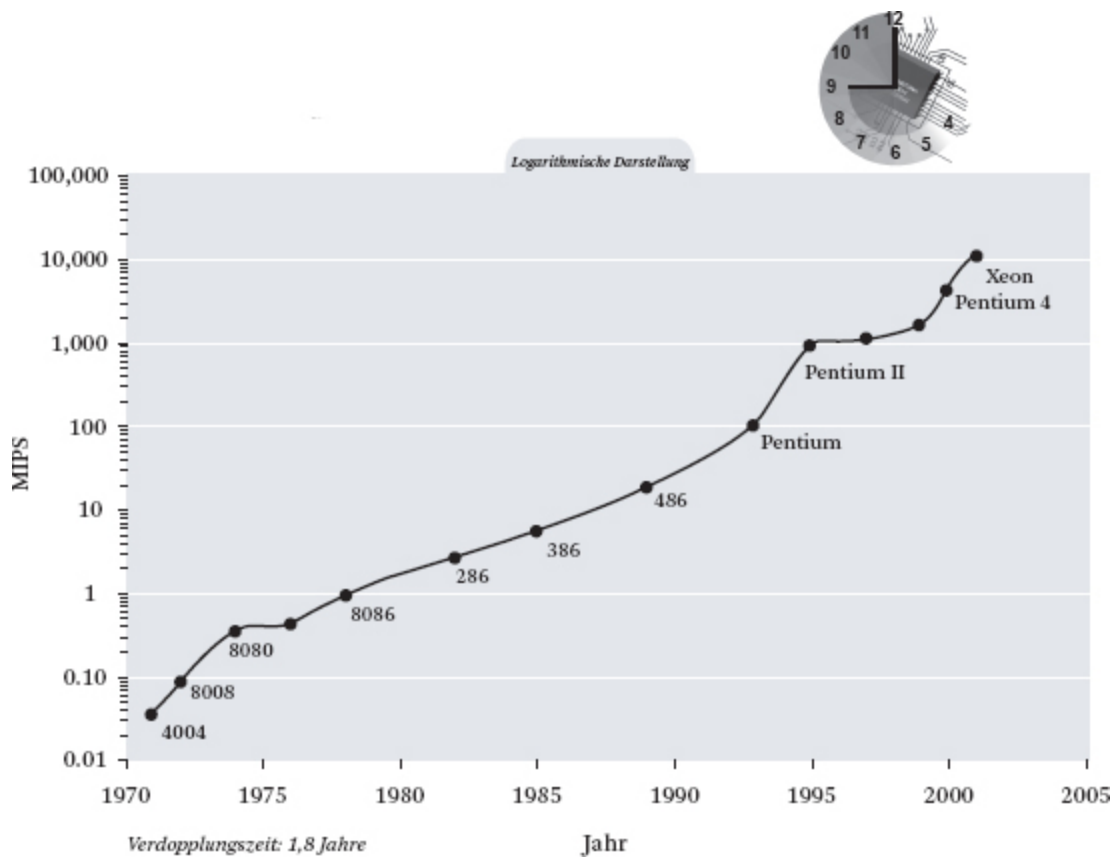
Die Anzahl von Transistoren in Intel-Prozessoren hat sich alle zwei Jahre verdoppelt (siehe untenstehende Abbildung). Auch diverse andere Faktoren (Taktfrequenz, Prozessorpreis, Architekturverbesserungen) haben das Preis-Leistungs-Verhältnis gedrückt.²⁸

Transistoren pro Mikroprozessor



Die Prozessorleistung in MIPS* hat sich alle 1,8 Jahre verdoppelt, wobei der Prozessorpreis in dieser Zeit, wie gesagt, gefallen ist.²⁹

Prozessorleistung (MIPS)



Nach über vier Jahrzehnten Erfahrung mit diesem Industriezweig kann ich den persönlichen Vergleich ziehen zwischen dem Rechner des MIT in den späten 1960ern und einem aktuellen Notebook. 1967 hatte ich das Vergnügen mit dem Multimillionen-Dollar-Modell IBM 7094 – mit 32k Speicherwörtern (ein Wort entsprach 36-Bit) und einer Prozessorleistung von einer viertel MIPS. Für den PC, den ich 2004 benutze, habe ich hingegen 2.000 \$ bezahlt. Er hat eine halbe Milliarde Bytes RAM und schafft etwa 2.000 MIPS. Da der MIT-Rechner ungefähr eintausend Mal teurer war, ergibt das ein Verhältnis von acht Millionen zu eins für die Kosten pro MIPS.

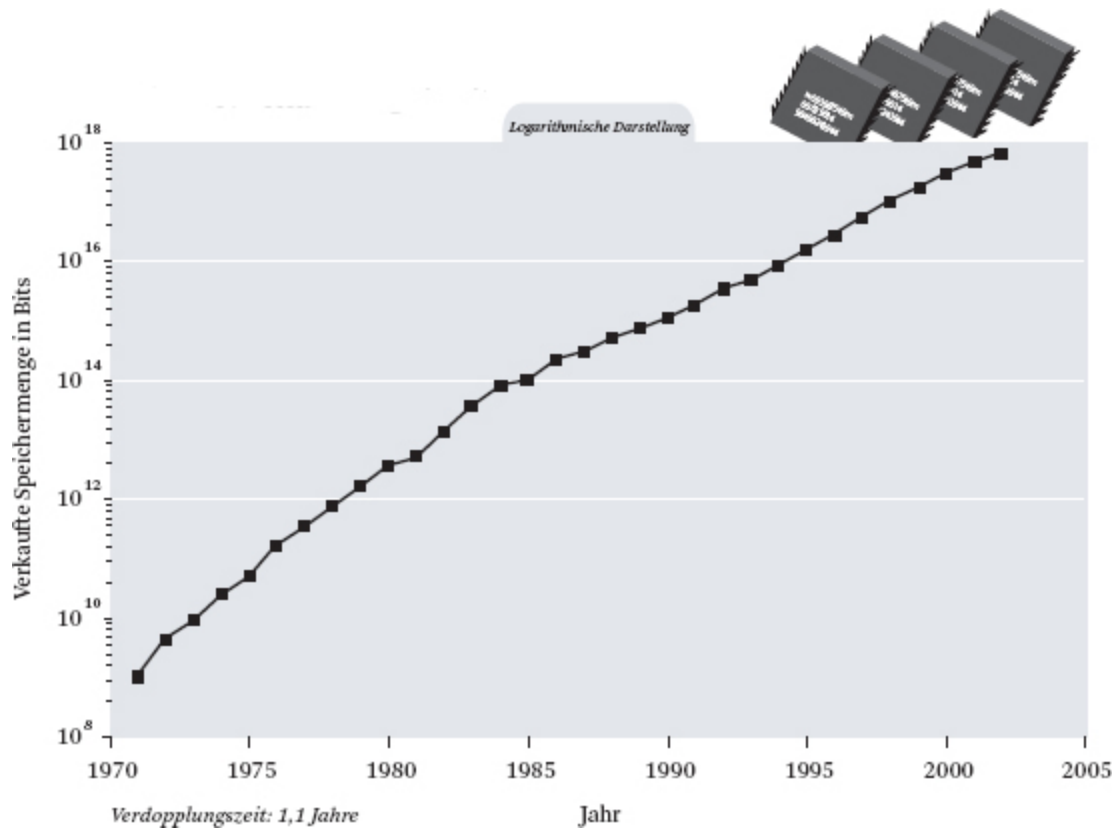
Messgröße	IBM 7094 circa 1967	Notebook circa 2004

Prozessorgeschwindigkeit (MIPS)	0,25	2 000
Hauptspeicher (K Bytes)	144	256 000
Ungefährer Preis (Dollar- Bezugsjahr: 2003)	\$11 000 000	\$2 000

Die Leistung meines derzeitigen Rechners ist also etwa 2²⁴ Mal preisgünstiger als im Jahre 1967. Das sind vierundzwanzig Verdopplungen in 37 Jahren – 18,5 Monate pro Verdopplung. Noch viel kürzere Intervalle ergeben sich, wenn wir jetzt noch den etwa 2.000 Mal größeren Arbeitsspeicher, den noch viel größeren Festplattenspeicher und den verbesserten Befehlssatz meines PCs in die Leistungsbewertung einbeziehen.

Trotz dieser massiven Deflation auf dem Hardware-Markt ist die Nachfrage größer denn je. Die Anzahl verkaufter Speicherbits verdoppelt sich alle 1,1 Jahre – der Bit-Preis dagegen halbiert sich nur alle 1,5 Jahre.³⁰ Die Halbleiterindustrie verzeichnete darum ein jährliches Wachstum von 18 Prozent im Zeitraum von 1958 bis 2002.³¹ Der Anteil der gesamten IT-Sparte am Bruttoinlandsprodukt der USA ist im Zeitraum 1977 bis 1998 von 4,2 Prozent auf 8,2 Prozent gestiegen.³² Die Informationstechnik hat einen wachsenden Einfluss auf alle Bereiche der Wirtschaft. Ihr Wertbeitrag zu allerlei Arten von Produkten und Dienstleistungen wird immer wichtiger. Selbst hinter einfachsten Erzeugnissen, beispielsweise Tischen und Stühlen, steckt Information in Form von Designdaten und der Programmierung von elektronischer Logistik und automatischen Fertigungssystemen.

Verkaufte Speichermenge in Bits



Verdopplungs- bzw. Halbwertszeiten³³

DRAM „Halfpitch“ Strukturgröße (kleinste Komponente)	5,4 Jahre
DRAM (Bits pro Dollar)	1,5 Jahre
Mittlerer Transistorpreis	1,6 Jahre
Kosten pro Mikroprozessor-Taktzyklus	1,1 Jahre
Verkaufter Speicher in Bits	1,1 Jahre
Prozessorleistung in MIPS	1,8 Jahre
Transistoren in Intel-Mikroprozessoren	2,0 Jahre
Taktgeschwindigkeit von Mikroprozessoren	3,0 Jahre

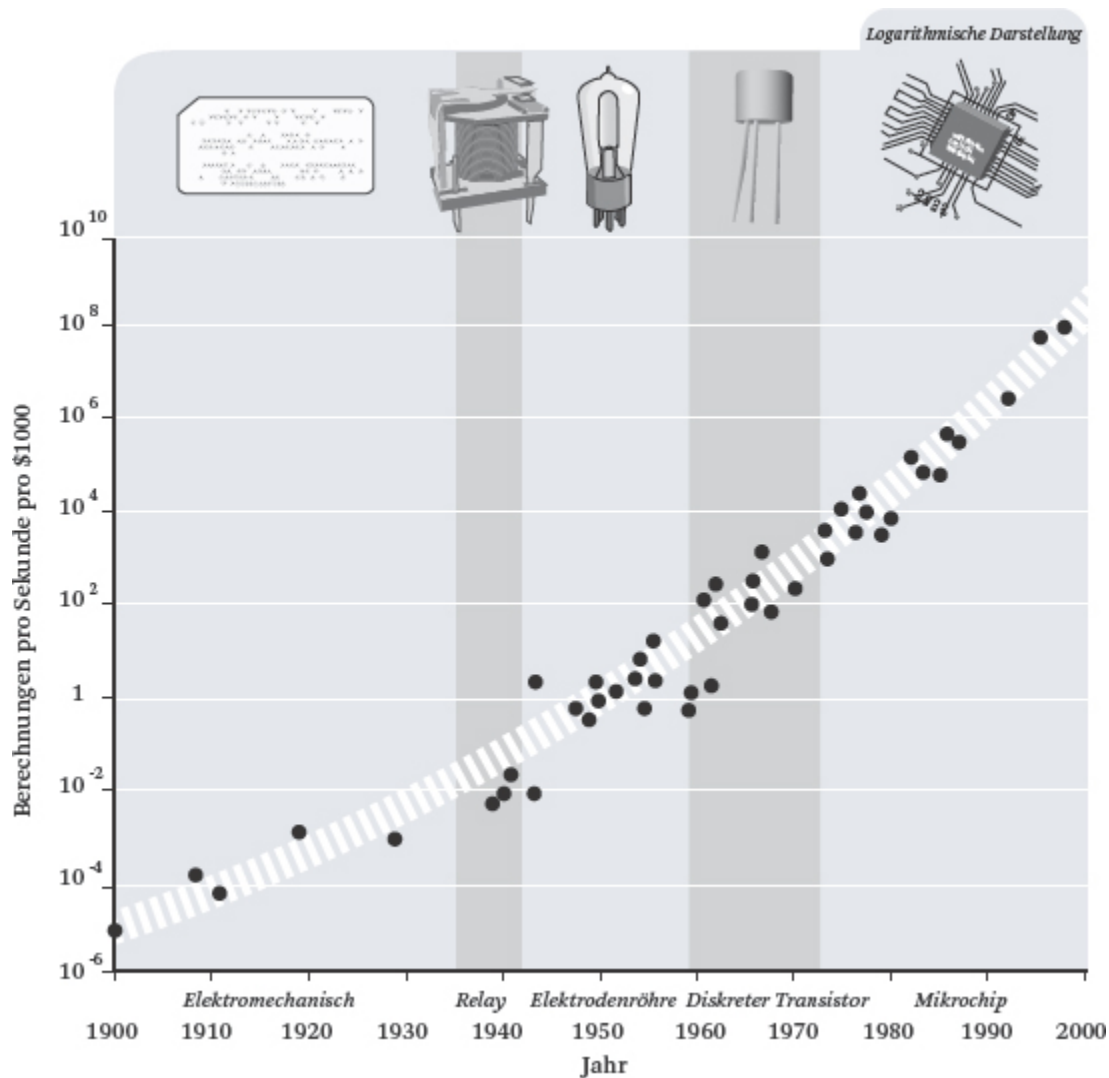
**Das Moore'sche Gesetz: eine selbsterfüllende
Prophezeiung?**

Das Moore'sche Gesetz wird gelegentlich als „self-fulfilling prophecy“ bezeichnet. Die Konzerne organisieren Forschung und Entwicklung dementsprechend, dass sie die Prognosen erfüllen – so die Behauptung. Die erwähnte Roadmap der Halbleiterindustrie sei dafür der schriftliche Beweis.³⁴ Doch exponentielle Entwicklungen finden sich auch jenseits des Moore'schen Gesetzes, nämlich in praktisch jedem technischen Bereich und jeder Messgröße, die mit Information zu tun hat. Davon betroffen sind auch viele Produkte, die eine zunehmende Preis-Leistungs-Steigerung erfahren, ohne dass wir es merken (siehe unten). Selbst was Rechenleistung anbelangt, finden die Leistungssteigerungen auf einer sehr viel breiteren Ebene statt, als durch das Moore'sche Gesetz gefordert.

Das fünfte Paradigma³⁵

Das Moore'sche Gesetz ist nicht das erste Paradigma der Computertechnik. Das wird in der untenstehenden Abbildung deutlich, die das Verhältnis von Instruktionen pro Sekunde pro eintausend Dollar (inflationbereinigt) von neunundvierzig großen Rechnersystemen des 20. Jahrhunderts nebeneinanderstellt.

Das Moore'sche Gesetz Das fünfte Paradigma



Die fünf Paradigmen des exponentiellen Wachstums der Rechnertechnik: Jedesmal wenn ein Paradigma ausgereizt war, trat ein anderes an seine Stelle.

Wie wir sehen, manifestierte sich der Exponentialtrend noch vor dem Mikrochip bereits in vier anderen Paradigmen: elektromechanische Systeme, Relays, Elektrodenröhren und diskrete Transistoren. Auch werden Mikrochips nicht das letzte Paradigma sein. Sobald das Ende der S-Kurve

erreicht ist (vermutlich 2020) und das Moore'sche Gesetz an Gültigkeit verliert, wird das fünfte Paradigma das Wachstum weitertragen: dreidimensionale Molekularschaltungen.

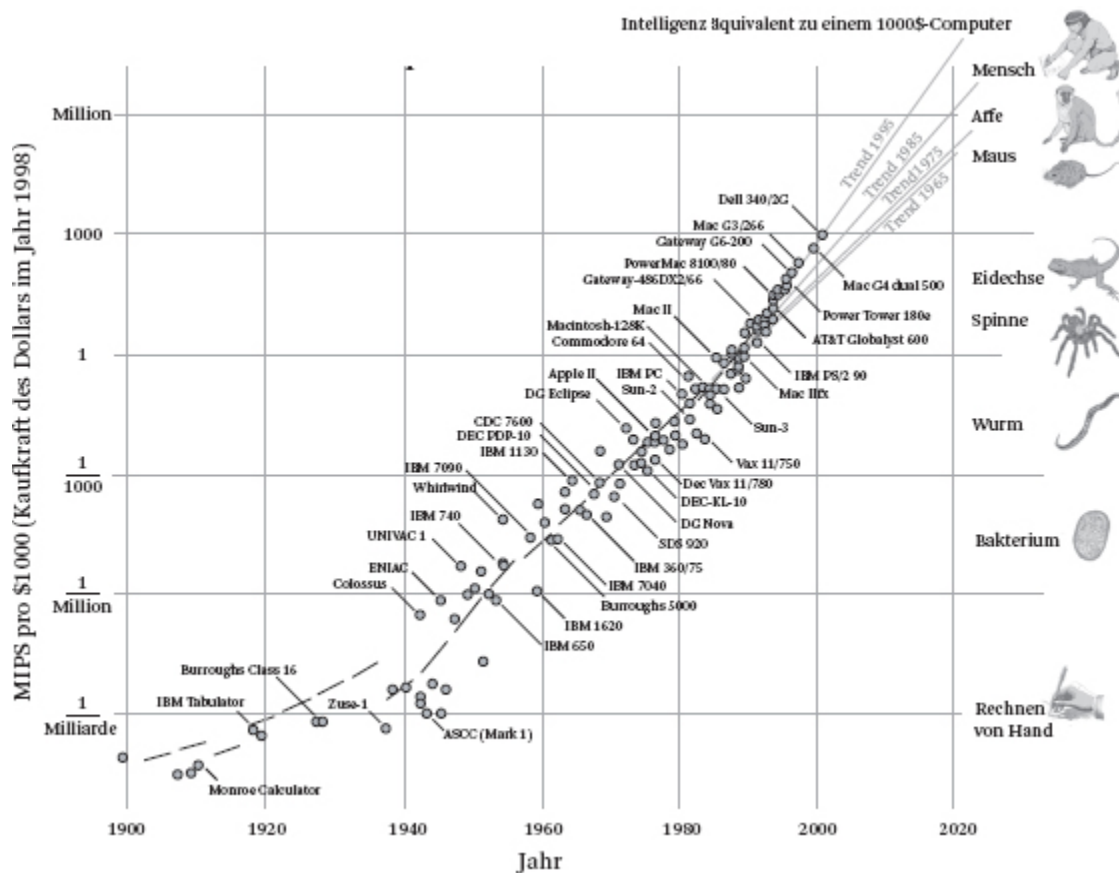
Fraktaldimensionen und das Gehirn

Dreidimensionalität von berechnenden Systemen ist kein Entweder-oder. Die menschliche Großhirnrinde beispielsweise ist mit ihren sechs Schichten eigentlich relativ flach. Diese sind allerdings gefaltet, was ihre Gesamtfläche entscheidend vergrößert. Eine Art, die dritte Dimension zu nutzen, ist das Falten einer zweidimensionalen Struktur. In fraktalen Systemen (die durch iteratives Anwenden von Faltungs- oder Ersetzungsregeln entstehen) betrachtet man Faltung als Teildimension, sprich die Dimensionalität der Hirnrinde liegt irgendwo zwischen zwei und drei. Andere Hirnstrukturen wie etwa das Kleinhirn bestehen aus einer dreidimensionalen Anordnung sich wiederholender, zweidimensionaler Strukturen. Die Rechenleistung der Zukunft wird vermutlich auf stark gefalteten zweidimensionalen Systemen basieren, die wiederum aus echten dreidimensionalen Strukturen bestehen.

Im Diagramm auf der linken Seite sehen wir trotz logarithmischem Maßstab die charakteristische Beugung einer Exponentialkurve.³⁶ Das bedeutet, dass auch die exponentielle Wachstumsrate exponentiell wächst. (Einfaches exponentielles Wachstum erscheint auf logarithmischen Achsen als gerade Linie; eine ansteigende Kurve bedeutet mehrfach exponentielles Wachstum). Wie wir sehen, verdoppelte sich das Preis-Rechenleistungs-Verhältnis zu Beginn des 20. Jahrhunderts innerhalb von drei Jahren, zur Jahrhundertmitte in zwei Jahren und heute ungefähr jährlich.³⁷

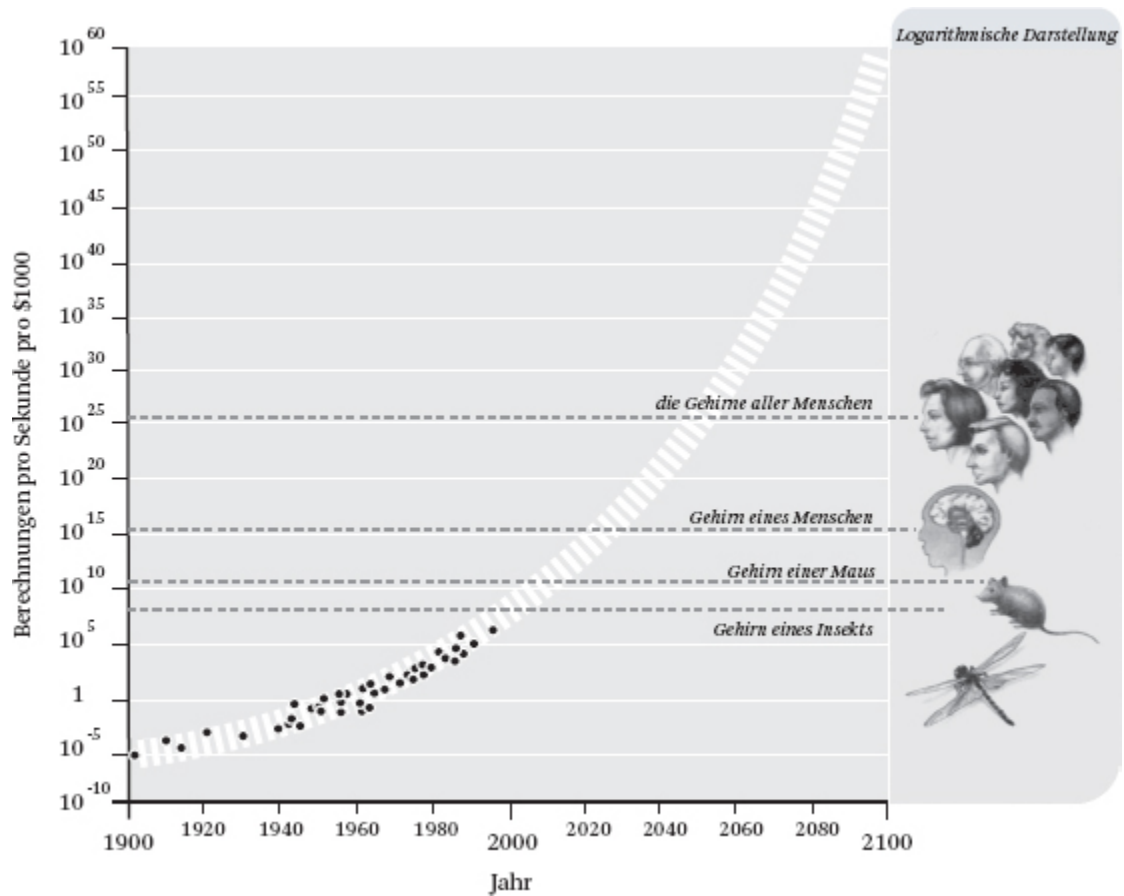
Das folgende Diagramm stammt von Hans Moravec. Es beruht auf einer etwas anderen Auswahl historischer Computersysteme und zeigt lineare Hochrechnung zu verschiedenen Zeitpunkten. Wie man sieht, werden die Prognoselinien mit der Zeit immer steiler – das ist die zweite Ebene des exponentiellen Wachstums.³⁸

Evolution von Leistung und Kosten von Computern



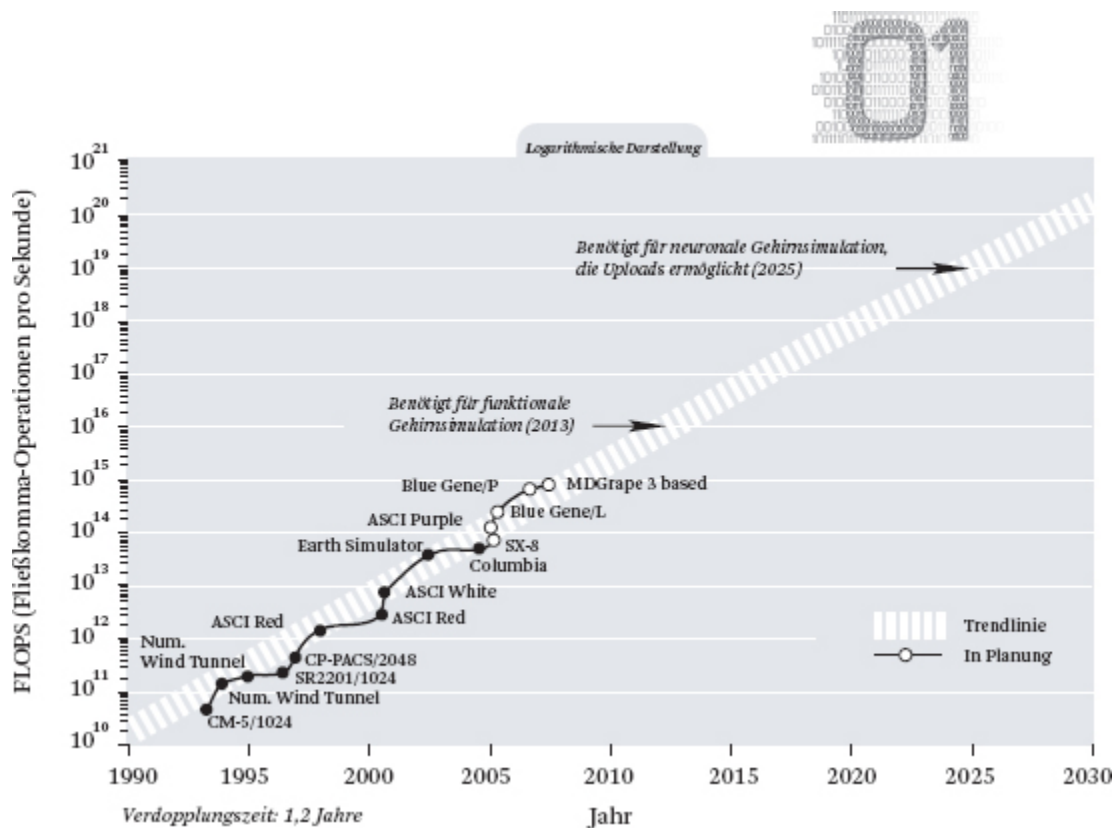
In der Abbildung auf der rechten Seite sehen wir eine Hochrechnung der Computerleistung über das nächste Jahrhundert. Zum Ende des Jahrzehnts erreichen Supercomputer die Leistung des menschlichen Gehirns, Heimcomputer gegen 2020 – oder auch früher, je nachdem wie konservativ man die Gehirnleistung bewertet. (Sinnvolle Maßstäbe lernen wir im nächsten Kapitel kennen).³⁹

Exponentielles Wachstum der Rechnertechnik Zwanzigstes und einundzwanzigstes Jahrhundert



Computer sind ein erstklassiges Beispiel dafür, wie sich die Produkte evolutionärer Prozesse exponentiell vermehren: Sie brauchten neunzig Jahre, um eine MIPS pro tausend Dollar zu erreichen. Heute kommt alle fünf Stunden eine weitere MIPS pro tausend Dollar dazu.⁴⁰

Wachstum der Leistung von Supercomputern



Für das Jahr 2007 plant IBM einen Supercomputer namens Blue Gene/P mit einer Million Gigaflops*: 10^{15} Rechenschritte pro Sekunde.⁴¹ Das ist bereits ein Zehntel der für die Emulation des Gehirns benötigten 10^{16} Operationen (siehe nächstes Kapitel), und wenn wir die Kurve extrapolieren, erreichen wir 10^{16} gegen Ende des Jahrzehnts.

Das Moore'sche Gesetz beschränkt sich ausschließlich auf die Transistoranzahl auf einer bestimmten Mikrochipfläche und wird manchmal auch anhand der Transistor-Strukturgröße ausgedrückt. Das beste Kosten-Nutzen-Maß ist jedoch Rechnerleistung pro Stückpreis, denn damit wird der gesamten Raffinesse Rechnung getragen, die – jenseits der Mikrochips – in modernen Computern steckt (und berücksichtigt somit Techniken wie Befehls-Pipelining, Parallelisierung, Instruction-look-ahead, Befehls- und Speichercaching, etc.).

Die elektrochemischen Prozesse im menschlichen Gehirn sind zwar analoger Natur aber digital gesteuert und: äußerst ineffizient. Für den Großteil der Berechnungen sind interneuronale Verbindungen zuständig, die nur etwa zweihundert Rechenschritte pro Sekunde leisten – mindestens eine Million Mal weniger als aktuelle elektrische Schaltkreise. Die außerordentlichen Fähigkeiten, die das Gehirn dennoch an den Tag legt, rühren von seinem massiv parallelen, *dreidimensionalen* Aufbau her – und die Computerindustrie hat bereits diverse Pläne für dreidimensionale Mikrochips in der Schublade (siehe nächstes Kapitel).

Da stellt sich die Frage, wo überhaupt die Grenzen der Rechenkapazität von Materie und Energie liegen. Im nächsten Kapitel sehen wir, dass diese Grenzen erst gegen Ende des Jahrhunderts eine Rolle spielen werden. Es ist wichtig, zwischen der S-Kurve einzelner Paradigmen und der kontinuierlichen Exponentialkurve eines breiten technischen Feldes wie dem der Rechnertechnik, zu unterscheiden: Ein einzelnes Paradigma wie das Moore'sche Gesetz erreicht immer irgendwann ein Stadium, in dem kein weiteres (exponentielles) Wachstum mehr möglich ist. Doch die Entwicklung der Rechenleistung lässt die einzelnen Paradigmen hinter sich und bleibt – zumindest fürs Erste – dauerhaft exponentiell.

Dank regelmäßiger Paradigmenwechsel ergibt sich aus einzelnen S-Kurven die eine kontinuierliche, dem Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs entsprechende Exponentialkurve. Sobald ein Paradigma seine natürlichen Grenzen erreicht, tritt ein neues an seine Stelle. In der Rechnertechnik ist das schon mindestens viermal geschehen. Die Lernkurve von Tieren (zum Beispiel Affen) bei der Herstellung und im Umgang mit Werkzeugen verläuft ebenfalls S-förmig – und endet abrupt. Die menschliche Technik dagegen erfährt seit ihren Anfängen ununterbrochenes exponentielles Wachstum und Beschleunigung.

DNS-Sequenzierung, Speicher, Kommunikation, das Internet und Miniaturisierung

Der Fortschritt der Zivilisation besteht in der Vergrößerung der Anzahl von wichtigen Operationen, die wir ausführen können, ohne darüber nachzudenken.

ALFRED NORTH WHITEHEAD, 1911⁴²

Mehr denn je sind die Dinge, wie sie sind.

DWIGHT D. EISENHOWER

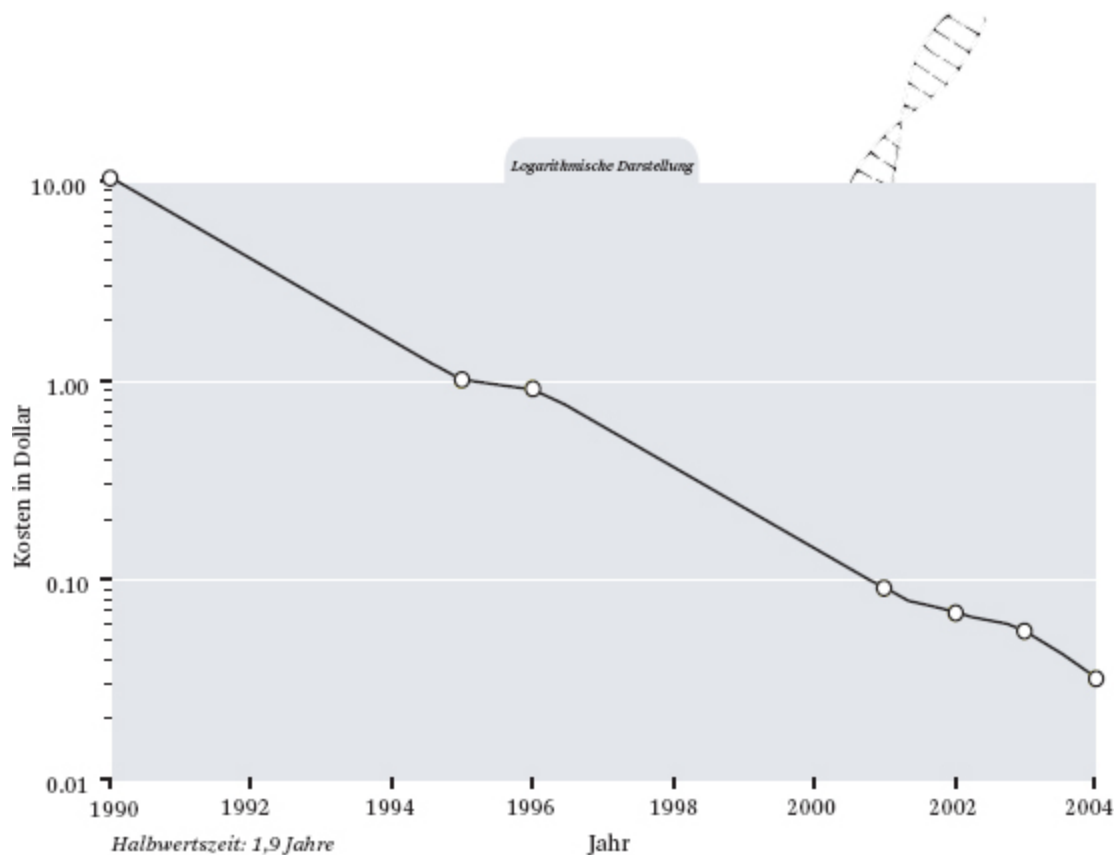
Das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs betrifft jede Art von Technik und jede Form der Evolution. In der Informationstechnik lässt sie sich präzise dokumentieren, da es dort eindeutige Messgrößen gibt. (Beispielsweise Operationen pro Sekunde pro Dollar). Auch in verschiedensten anderen Gebieten finden wir das charakteristische exponentielle Wachstum: DNS-Sequenzierung, Kommunikation, Gehirnschans, Gehirnmodellierung, Umfang des menschlichen Wissens und das immer kleiner werdende Format technischer Geräte. Letztgenannte Entwicklung steht im direkten Zusammenhang mit dem Auftreten der Nanotechnik.

Das künftige GNR-Zeitalter (Genetik, Nanotechnik, Robotik; siehe **Kapitel 5**) beruht nicht nur auf einer exponentiellen Explosion von Computerleistung, sondern auf dem synergetischen Zusammenwirken unzähliger ineinandergreifender technischer Innovationen – und jeder beliebige Abschnitt in diesem Entwicklungsprozess ist eine Geschichte von Erfolg und Scheitern, ein menschliches Drama von Innovation und Wettbewerb. Es ist schon bemerkenswert, dass so viel Chaos zu einer gleichmäßigen und zuverlässigen Wachstumskurve führt – doch das ist kein Zufall, sondern liegt in der Natur evolutionärer Prozesse.

Als man 1990 die Sequenzierung des menschlichen Genoms in Angriff nahm, waren Kritiker der Meinung, dass das Projekt aufgrund der damaligen Geschwindigkeit Tausende von Jahren brauchen würde.

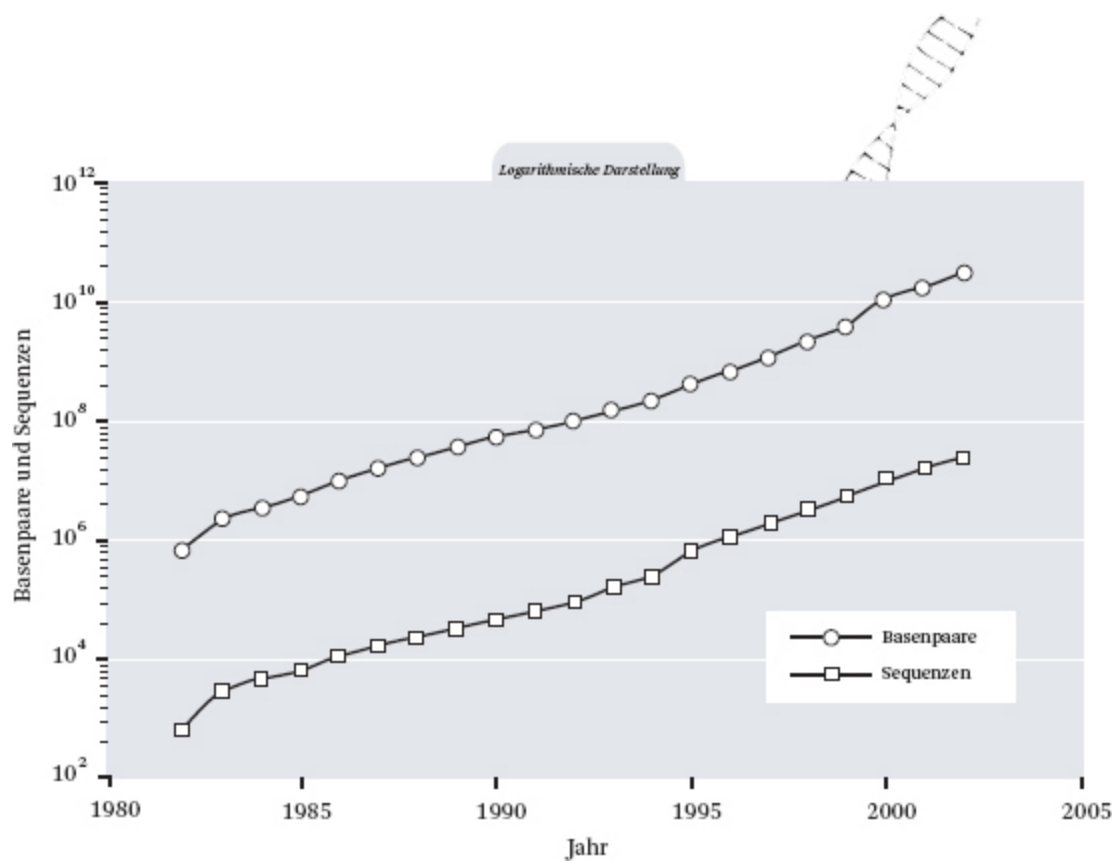
Ausgelegt war es allerdings auf nur fünfzehn Jahre, und lag letztendlich mit einem ersten Ergebnis im Jahr 2003 etwas vor dem Zeitplan.⁴³ Die DNS-Sequenzierungskosten pro Basenpaar sind zwischen 1990 und 2004 von zehn Dollar auf ein paar Pence gesunken und sinken weiter rapide (siehe Abb. auf folgender Seite).⁴⁴

Kosten für DNS-Sequenzierung (pro Basenpaar)



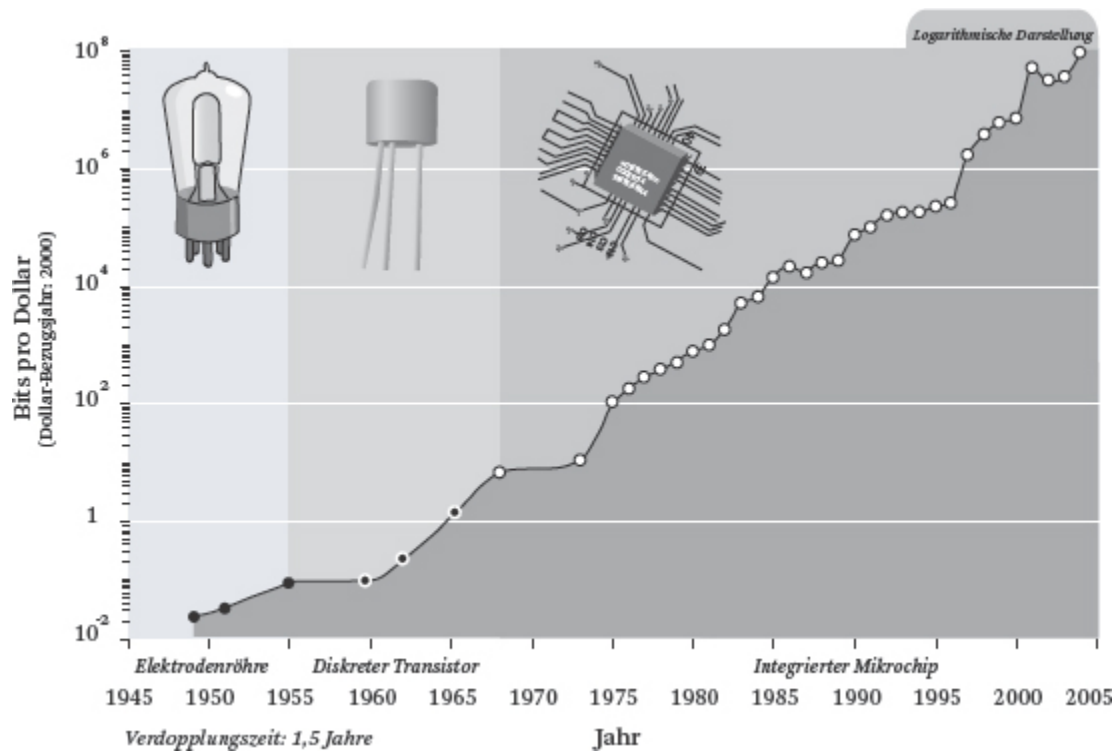
Die Menge erfasster DNS-Sequenz-Daten wächst gleichmäßig exponentiell an (siehe Abbildung unten).⁴⁵ Ein klares Beispiel für die steigende Kapazität ist die vollständige Sequenzierung des SARS-Virus innerhalb von einunddreißig Tagen nach Identifizierung des Erregers – die Sequenzierung von HIV dauerte damals fünfzehn Jahre!⁴⁶

Wachstum der GenBank DNS-Sequenzdaten



Exponentielles Wachstum sehen wir selbstverständlich auch bei elektronischen Datenspeichern, beispielsweise RAM. Das untenstehende logarithmische Kurvenbild zeigt einen gleichmäßigen Trend, der sich über mehrere Paradigmen erstreckt – von der Elektronenröhre bis zum Mikrochip.⁴⁷

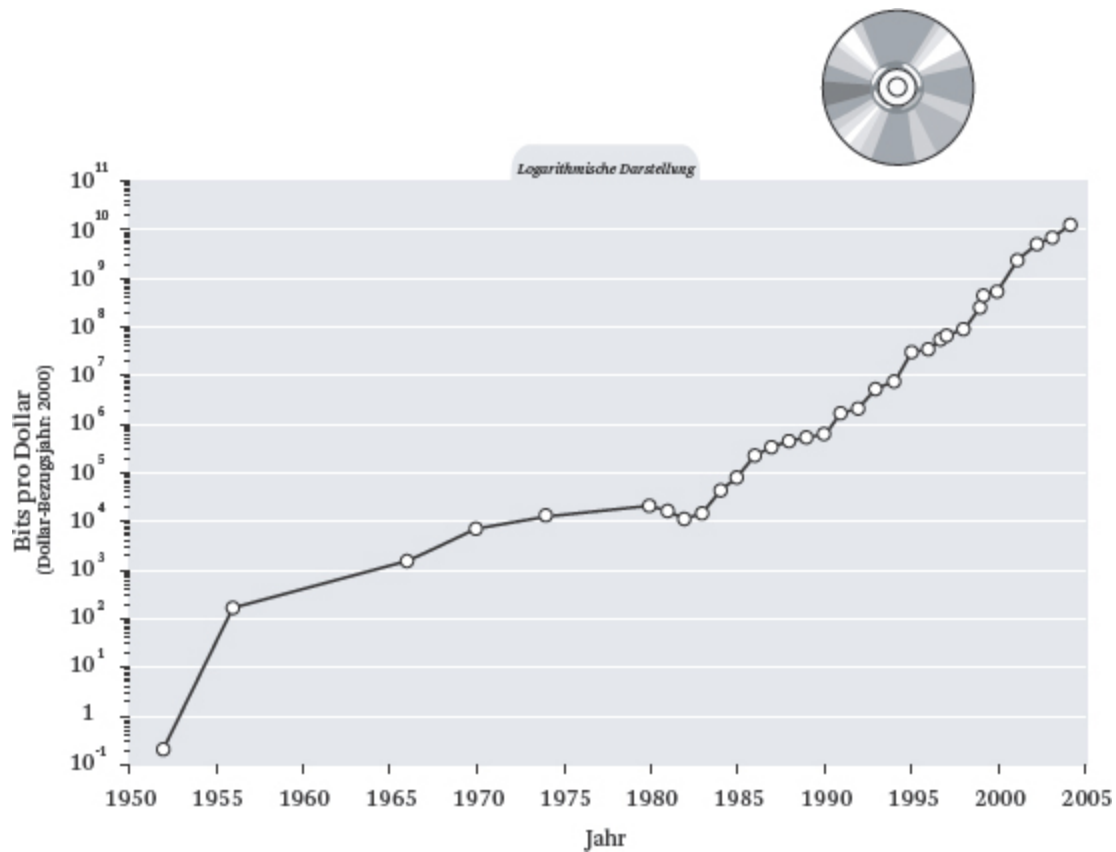
RAM Bits pro Dollar (1949–2004)



Exponentielles Wachstum von RAM-Kapazität über mehrere Paradigmen hinweg.

Das Preis-Leistungs-Verhältnis von magnetischen Plattenspeichern hat nichts mehr mit dem Moore'schen Gesetz zu tun. Hier werden Daten auf ein magnetisches Trägermaterial gequetscht, anstatt Transistoren auf eine Platine: andere Problemstellung, andere Ingenieure, andere Firmen – dieselbe exponentielle Entwicklung.⁴⁸

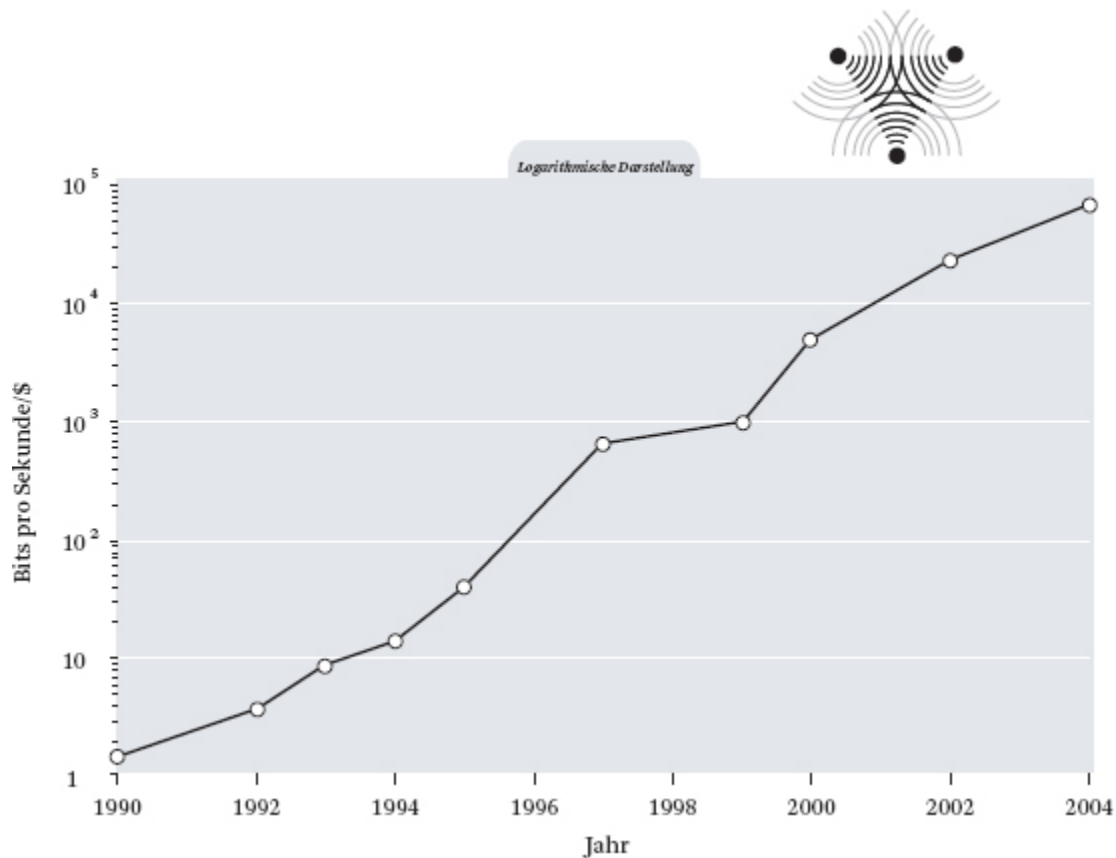
Magnetischer Datenspeicher Bits pro Dollar



Noch explosiver als die Informationsverarbeitung und -speicherung vermehrt sich seit vielen Jahren schon die Informationsübertragung – messbar am exponentiellen Wachstum der Kommunikationstechnik. Auch diese Entwicklung geht über das bloße Transistorschrumpfen hinaus: Sie umfasst Glasfaseroptik, optical switching*, elektromagnetische Technik und andere Faktoren.⁴⁹

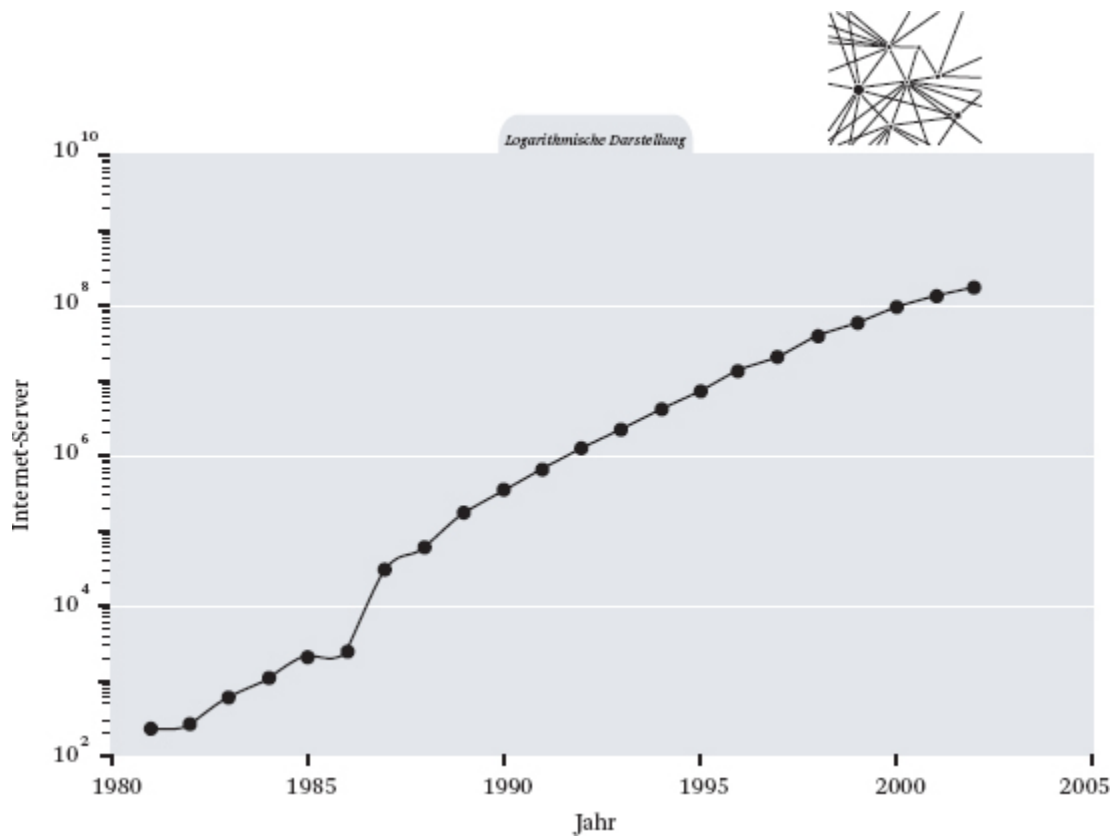
Allmählich bewegen wir uns weg vom Kabelsalat und hin zur drahtlosen Kommunikation, deren Leistungsfähigkeit sich alle zehn bis elf Monate verdoppelt (siehe untenstehende Abbildung).

Preis-Leistung (von drahtloser Datenübertragung)



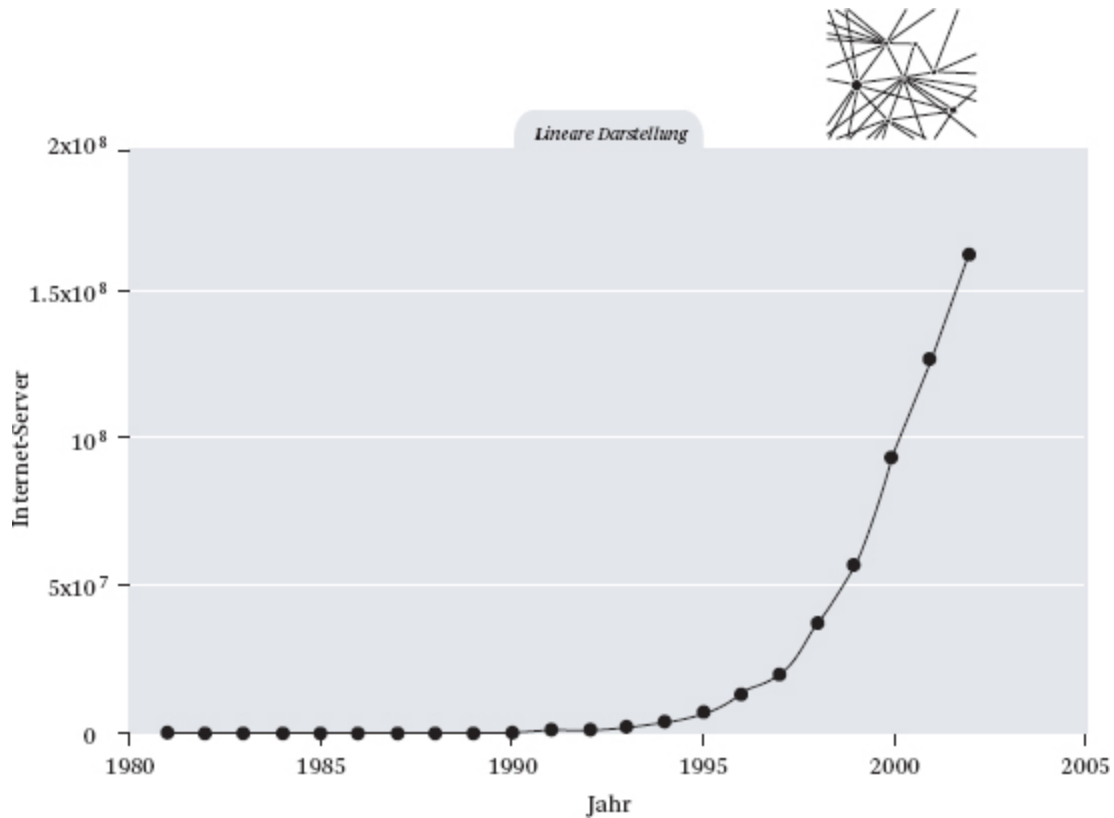
Die folgenden Abbildungen illustrieren den Ausbau des Internets, gemessen an der Anzahl von Webhosts. Die Diagramme enthalten dieselben Daten, einmal logarithmisch, einmal linear. Wie zuvor besprochen, erscheint uns exponentielles Technikwachstum meist linear. Für die meisten Leute kam das World Wide Web Mitte der 1990er wie aus dem Nichts geplatzt. Dabei war die weltweite Verbreitung des Internets schon Anfang der 1980er absehbar, denn der exponentielle Trend war bereits beim ARPANET, dem Vorgänger des Internets, erkennbar.⁵⁰

Internet-Server



Das gleiche Diagramm mit linearer Skalierung.⁵¹

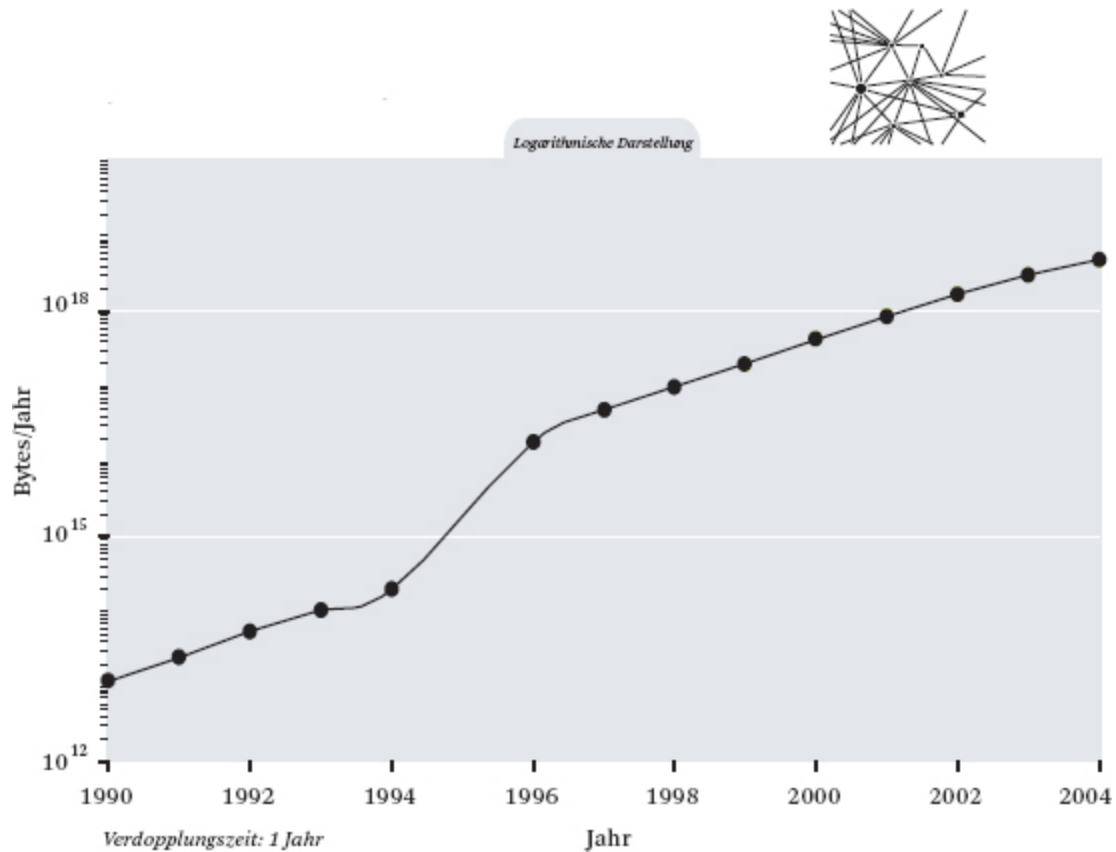
Internet-Server



Im linearen Diagramm scheint die Explosion des Internets eine überraschende Entwicklung zu sein, die logarithmische Darstellung zeigt jedoch, dass sie genau absehbar war.

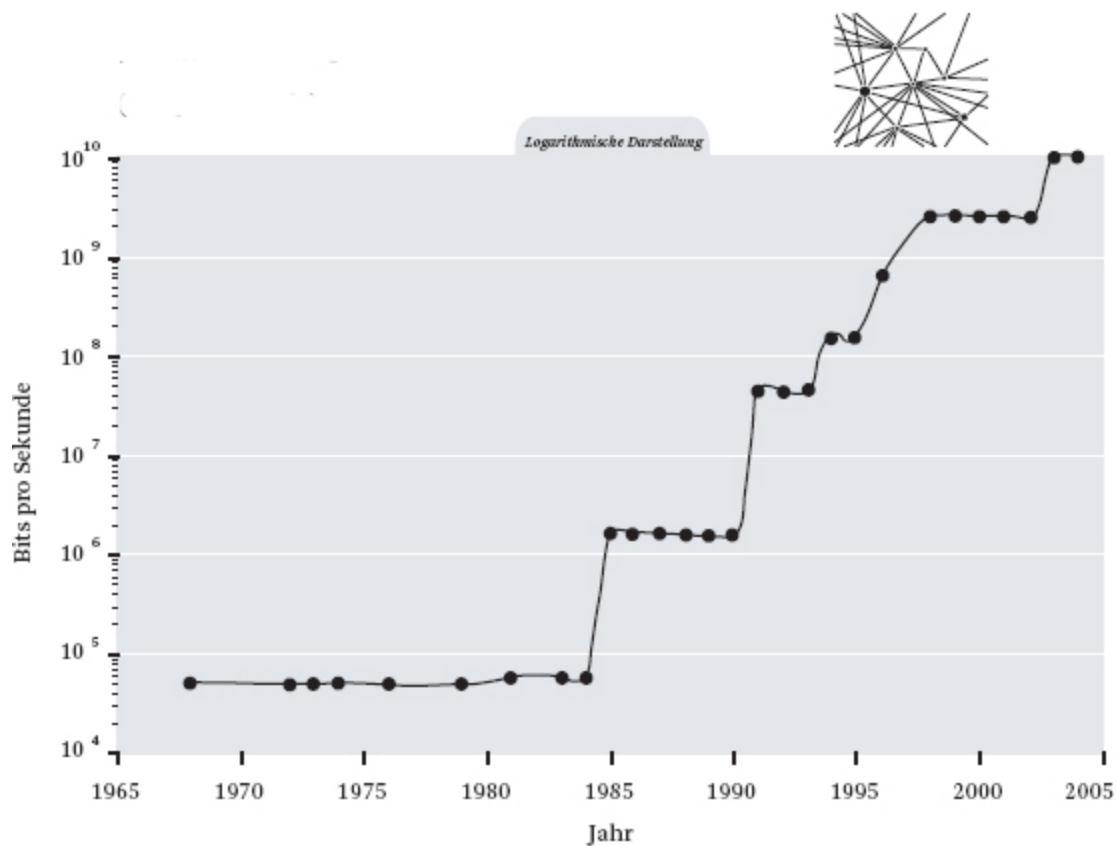
Nicht nur die Server haben sich vermehrt, auch der Datenverkehr verdoppelt sich jedes Jahr.⁵²

Internet-Datenverkehr



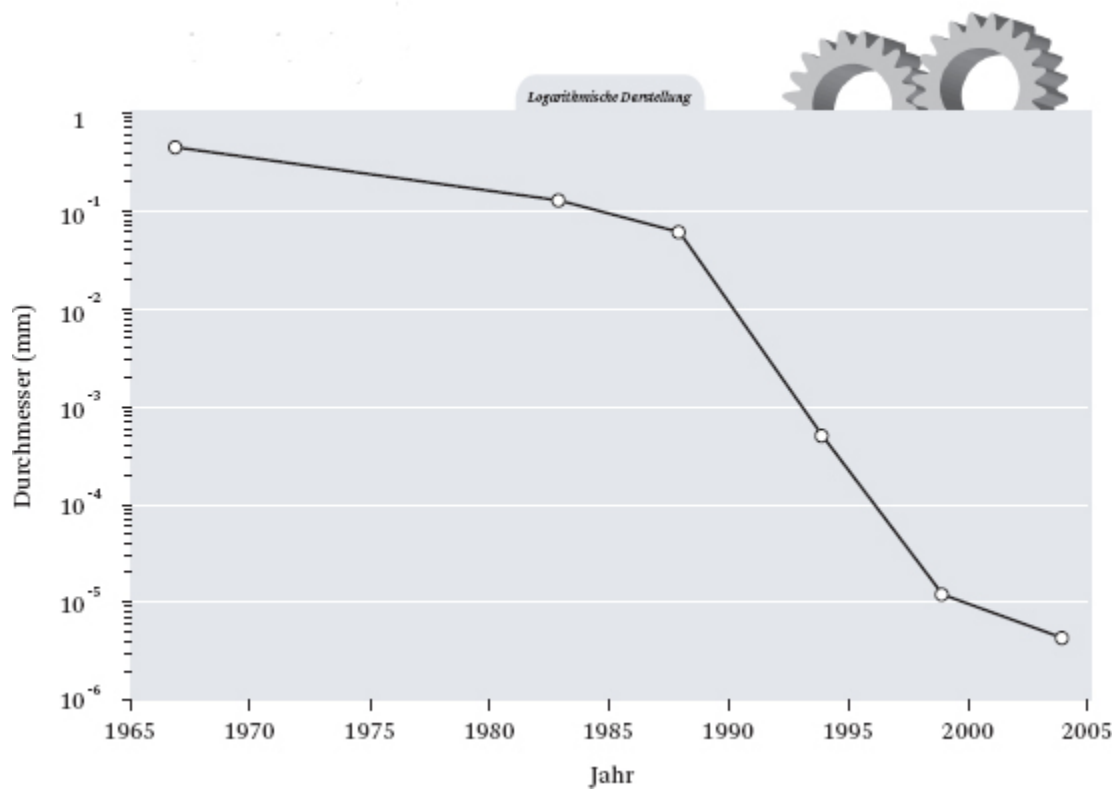
Der zunehmende Datenverkehr wird möglich durch die exponentiell wachsende Übertragungsgeschwindigkeit des Leitungsnetzes (gemessen an der jeweils schnellsten Netztechnik im Einsatz). In der untenstehenden Abbildung sehen wir eine Reihe markanter S-Kurven: Jedes neue Paradigma bringt eine deutliche Beschleunigung, gefolgt von Stagnation bis zum nächsten Paradigmenwechsel.⁵³

Bandbreite des Internet-Backbones (Bits pro Sekunde)



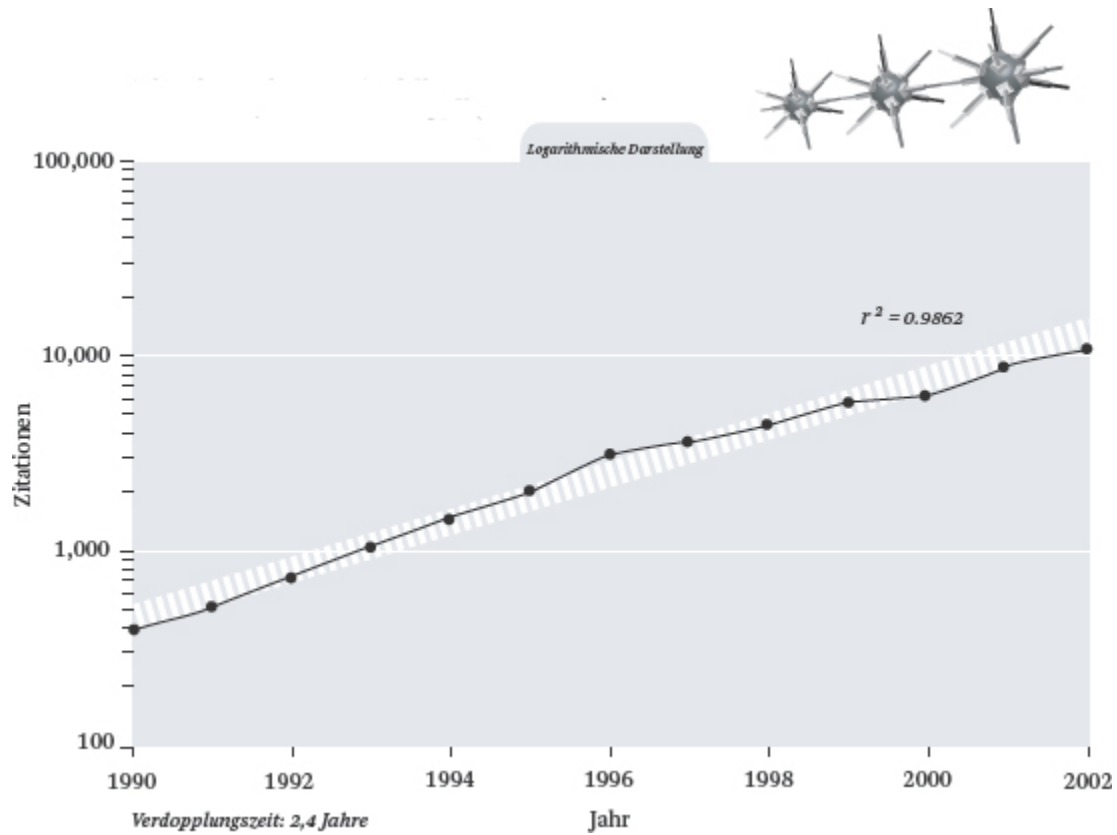
Eine weitere Entwicklung mit tiefgreifenden Konsequenzen für das 21. Jahrhundert ist Miniaturisierung. Alle möglichen elektronischen und mechanischen Bauteile werden exponentiell kleiner – derzeit alle zehn Jahre um einen Faktor vier in jeder Dimension. Miniaturisierung ist die treibende Kraft hinter dem Moore'schen Gesetz, findet jedoch bei allen Arten von elektronischen Systemen statt – beispielsweise bei Magnetspeichern. Die untenstehende Abbildung zeigt, dass auch mechanische Geräte immer kleiner werden.⁵⁴

Abnahme der Größe mechanischer Geräte (Durchmesser in mm)



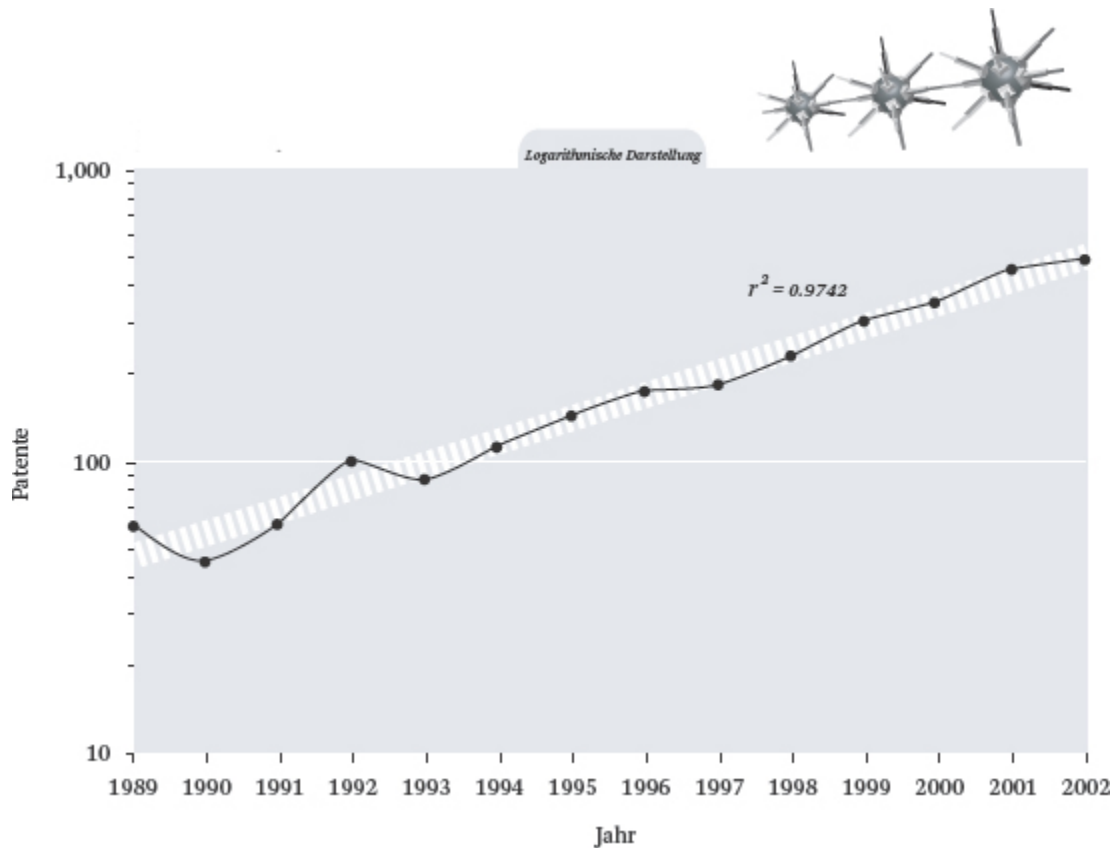
Während technische Strukturgrößen schrumpfen und sich unaufhaltsam dem Nanometer-Bereich annähern, steigt das allgemeine Interesse an Nanotechnik: Wissenschaftliche Veröffentlichungen zu diesem Thema wurden im Verlauf des Jahrzehnts immer häufiger zitiert, wie wir in der nächsten Abbildung sehen.⁵⁵

Zitation wissenschaftlicher Arbeiten zur Nanotechnik (1990–2002)



Dem entspricht auch eine Zunahme von Patenten im Bereich Nanotechnik (siehe unten).⁵⁶

Nanotechnik-Patente in den USA



In **Kapitel 5** besprechen wir, wie im Zuge der Informationsrevolution die exponentielle Zunahme von Kapazität und Preis-Leistung auch die Biologie erfasst – in Form einer genetisch-biotechnischen Revolution. Analog dazu werden durch die nanotechnische Revolution auch physische Materialien und mechanische Systeme Teil des beherrschbaren Informationswesens. Mit der Robotik-Revolution (das Auftreten „starker KI“) schließlich wird das Reverse Engineering des menschlichen Gehirns vollendet. Das heißt, die menschliche Intelligenz wird vollständig verstanden – und somit eine beherrschbare Information – sein, und die daraus resultierenden Erkenntnisse werden mit der immer leistungsfähigeren Rechnertechnik kombiniert werden. Somit sind die drei großen Transformationen in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts – Genetik, Nanotechnik, Robotik – allesamt Facetten der Informationsrevolution.

Information, Ordnung und Evolution: Wolframs Überlegungen und Fredkins Zelluläre Automaten

In diesem Kapitel haben wir gesehen, dass Informationen und Informationstechnik exponentiell zunehmen. Indem wir annehmen, dass die Menschheit der Singularität entgegensteuert, schreiben wir dem Informationswesen eine tiefgreifende Bedeutung für unsere Zukunft zu. Informationen finden sich auf jeder physikalischen Daseinsebene*: Jede Form menschlichen Wissens und künstlerischen Ausdrucks kann als digitale Information ausgedrückt werden – ob wissenschaftliche Überlegungen oder technische Baupläne, ob Literatur, Musik oder Filme.

Auch unser Gehirn arbeitet digital, nämlich mit diskreten Erregungszuständen von Neuronen. Das synaptische Netz lässt sich digital darstellen, und der Aufbau des Gehirns ist in einem erstaunlich kompakten, digitalen, genetischen Code beschrieben.⁵⁷

Tatsächlich basiert die gesamte Biologie auf Sequenzen von 2-Bit-Buchstaben (DNS-Strängen), welche wiederum Proteinsequenzen kodieren, die sich aus nur zwanzig verschiedenen Aminosäuren zusammensetzen. Einzelne Moleküle wiederum sind diskrete Atomstrukturen. Insbesondere das Kohlenstoffatom – mit seinen vier Valenzelektronen** – ermöglicht ein breites Sortiment an dreidimensionalen Strukturen, weshalb ihm eine zentrale Rolle in Natur und Technik zukommt. Innerhalb eines Atoms nehmen Elektronen diskrete Energieniveaus ein. Andere subatomare Partikel, beispielsweise Protonen, sind durch ganzzahlige Beträge von Valenzquarks bestimmt.

Quantenmechanische Beschreibungen beinhalten zwar neben diskreten Zuständen auch kontinuierliche (stufenlose) Felder, doch auch kontinuierliche Felder können mit jeder gewünschten Genauigkeit als Binärdaten ausgedrückt werden.⁵⁸

Wie der Name schon vermuten lässt, basiert die Quanten-Mechanik also auf diskreten Werten.

Der Physiker und Mathematiker Stephen Wolfram belegt eingehend, wie zunehmende Komplexität in einem deterministisch-algorithmischen

Universum entstehen kann, das nach feststehenden, berechenbaren Regeln funktioniert. In seinem Buch *A New Kind of Science* legt Wolfram ausführlich dar, wie unsere Welt auf jeder Ebene durch simple mathematische Konstrukte, sogenannte „Zelluläre Automaten“, beschrieben werden kann.⁵⁹ (Zelluläre Automaten sind denkbar einfache, algorithmische Systeme, beispielsweise ein Raster von Zellen, deren Farbe sich in jedem Rechenschritt abhängig von der Farbe der Nachbarzellen verändert).

Wolfram vertritt die Meinung, dass jeder Informationsprozess durch Zelluläre Automaten beschreibbar ist, und berührt damit mehrere zentrale Fragen im Zusammenhang mit Wesen und Bedeutung von Information. Wolfram postuliert, das Universum selbst sei ein Zellulärer Automat, also ein gigantischer Computer. Demnach stünde hinter allen scheinbar analogen Naturerscheinungen (wie Zeit oder Bewegung) und hinter jeder physikalischen Formel eine digitale Ursache. Unser derzeitiges Physikverständnis wäre vollständig durch die einfachen Transformationsregeln eines Zellulären Automaten beschreibbar.

Der Gedanke ist nicht neu. Richard Feynman erwog dieselbe Hypothese bei seinen Überlegungen über das Verhältnis von Information zu Materie und Energie. Norbert Wiener prophezeite in seinem Buch *Cybernetics* (1948) einen grundlegenden Perspektivenwechsel und schlug vor, den Wandel von Information (anstatt des Wandels von Energie) als Grundbaustein des Universums zu betrachten.⁶⁰ Der Erste, der behauptete, das Universum werde auf einem digitalen Computer simuliert, war vermutlich Konrad Zuse⁶¹ – wohlbekannt als Erfinder des ersten funktionsfähigen, programmierbaren Computers (Entwicklungszeitraum 1935–1941).

Ein begeisterter Vertreter informationsbasierter Physik war Edward Fredkin. In den frühen 1980ern präsentierte er eine „neue Theorie der Physik“, nach welcher das ganze Universum letzten Endes Software ist. Die Realität besteht, so Fredkin, nicht in Partikeln und Kräften, sondern in Datenbits und Rechenregeln*.

Robert Wright zitierte Fredkin in den 1980ern folgendermaßen:

In der Philosophie gibt es drei große Fragen: Was ist Leben? Was ist Bewusstsein und Denken und Erinnerung und so weiter? Und wie funktioniert das Universum? [...] Der „informationale Standpunkt“ betrifft alle drei. [...] Mein Punkt ist: Auf der untersten Komplexitätsebene steht ein Informationsprozess hinter dem, was wir Physik nennen. Auf einer viel höheren Ebene wird das Leben, die DNS – biochemische Funktionen und so – ebenfalls von einem digitalen Prozess gesteuert. [...] An tausend verschiedenen Stellen finde ich Hinweise. [...] Und ich bin einfach überwältigt. Es ist, als würde ich einem Tier nachjagen: Ich sehe seine Fußspuren. Ich sehe seine Exkremente. Ich finde angenagte Essensreste. Ich finde Fellrückstände und so weiter. Alles deutet auf eine ganz bestimmte Tierart hin, eine, die noch kein Mensch zu Gesicht bekommen hat. Die Leute fragen: Wo soll dieses Vieh denn sein? Ich sage: Es war hier, es ist so und so groß, und so weiter. Und ich weiß tausend Dinge über es. Ich bekomme es nicht zu fassen, aber ich weiß, dass es da ist. [...] Was ich sehe, ist so überzeugend, es kann nicht nur ein Produkt meiner Einbildung sein.⁶²

Zu Fredkins digitaler Physik schreibt Wright:

Fredkin [...] beschreibt eine interessante Charakteristik bestimmter Computerprogramme einschließlich vieler Zellulärer Automaten: Es gibt keine Abkürzung auf dem Weg zu ihrem Ergebnis. Hier haben wir einen grundlegenden Unterschied zwischen dem „analytischen“ Ansatz der traditionellen Mathematik und dem „berechnenden“ Ansatz mit Algorithmen. Lässt ein System den analytischen Ansatz zu, so kann man zukünftige Zustände ermitteln, ohne alle Zustände auf dem Weg dorthin zu betrachten. Bei vielen Zellulären Automaten bleibt einem jedoch nichts anderes übrig, als alle Zwischenzustände durchzugehen, um herauszufinden, wie das Ende aussieht: Der einzige Weg, die Zukunft zu kennen, ist ihr Eintreten abzuwarten. [...] Fredkin erklärt: „Manche Fragen lassen sich unmöglich schneller beantworten, als die Dinge passieren.“ [...] Fredkin glaubt, das Universum sei buchstäblich ein Computer, den irgendwer oder irgendetwas benutzt, um ein bestimmtes Problem zu lösen. Klingt wie ein good-news/bad-news-Witz: Die gute Nachricht ist, unser Leben hat einen Sinn; die schlechte Nachricht ist, der Sinn besteht darin, für irgendeinen Hacker die ersten neun Zillionen Nachkommastellen von Pi zu berechnen.⁶³

Zwar erfordert das Speichern und Abrufen von Informationen Energie, Fredkin zeigt jedoch, dass sich der Energiebedarf für Informationsverarbeitung in jedem konkreten Einzelfall beliebig weit – ohne Untergrenze – reduzieren lässt.⁶⁴ Demnach kann Information als fundamentaler betrachtet werden als Energie und Materie.⁶⁵ In **Kapitel 3** werde ich noch mal auf Fredkins Überlegungen zurückkommen, denn der Energiemindestbedarf für Berechnung und Speicherung von Information bestimmt auch die ultimative Denkkraft des Universums.

Den Anstoß zu Wolframs Theorie gab eine einzige spannende Entdeckung: die Automatenregel 110 und ihr Produkt. (Natürlich gibt es

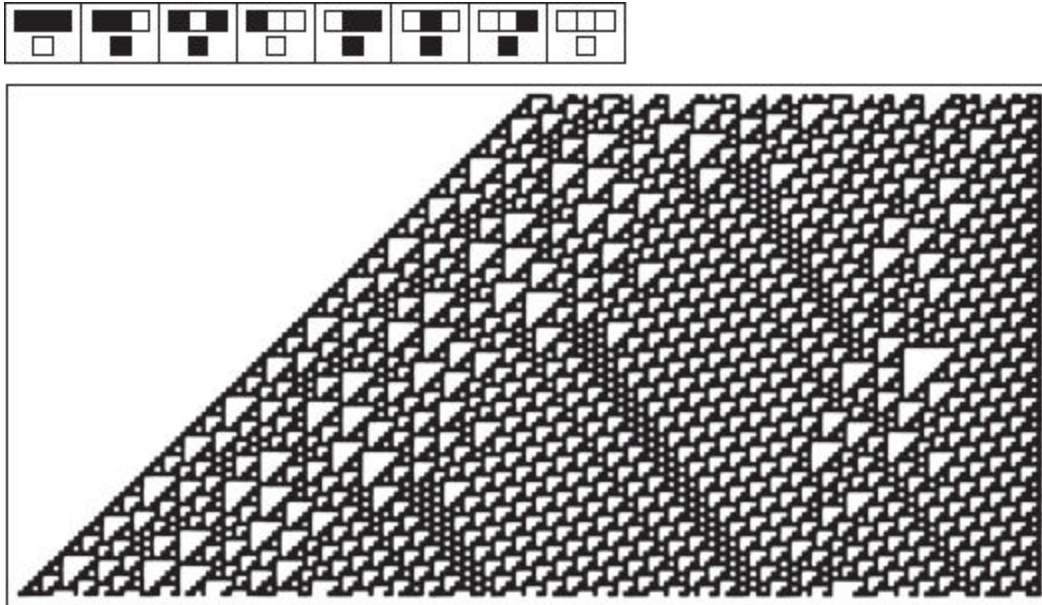
noch andere interessante Regeln für Zelluläre Automaten, aber Nr. 110 reicht aus, um das Prinzip zu verdeutlichen). Wolframs Untersuchungen drehen sich in der Regel um möglichst einfache Automaten, und zwar insbesondere um solche mit einer eindimensionalen Zellenreihe, zwei Farben (Schwarz und Weiß) und Übergangsregeln, die nur von den beiden jeweiligen Nachbarzellen abhängen. Das heißt, mit jedem Rechenschritt ändert jede Zelle ihre Farbe abhängig davon, welche Farbe sie selbst und ihr linker und rechter Nachbar bisher hatten. Somit gibt es acht mögliche Ausgangssituationen (dreifache Kombination von je zwei möglichen Farben). Jede Regel bildet diese Ausgangssituationen auf je einen Folgezustand (schwarz oder weiß) ab. Es gibt also 2^8 (256) mögliche Regeln für einen eindimensionalen, zweifarbigen Automaten, der nur direkte Nachbarn berücksichtigt. Aufgrund von Links-rechts-Symmetrie ist die eine Hälfte der möglichen Regeln äquivalent zur anderen. Davon ist wiederum eine Hälfte redundant, da Schwarz und Weiß vertauschbar sind, somit verbleiben 64 mögliche Regeln. Wolfram veranschaulicht das Verhalten solcher Automaten durch Diagramme, in denen (von links nach rechts gesehen) jede Spalte eine neue Zellengeneration darstellt, die durch Anwendung der Regel auf jede Zelle der vorherigen Spalte entsteht.

Die meisten Regeln sind degenerativ, das heißt, sie produzieren uninteressante, sich wiederholende Muster, zum Beispiel einfarbige Spalten oder Schachbrettmuster. Solche Regeln bezeichnet Wolfram als Automaten der Klasse 1. Die meisten Regeln fallen in Klasse 2: Sie erzeugen verschiedene Spaltenmuster, die sich jedoch mit jeder Generation wiederholen. Regeln der Klasse 3 sind schon etwas interessanter. Ihre Diagramme weisen eine zufällige Abfolge erkennbarer Strukturen (zum Beispiel Dreiecke) auf.

Doch erst Automaten der Klasse 4 sorgten für das Aha-Erlebnis, das Wolfram veranlasste, dem Thema ein Jahrzehnt lang seine Schaffenskraft zu widmen. Die besagte Regel 110 ist ein Musterbeispiel für diese Klasse. In den Diagrammen solcher Automaten sehen wir Linien in verschiedenen Winkeln, Anhäufungen von Dreiecken und andere interessante Strukturen. Das erzeugte Muster ist weder regelmäßig, noch

völlig chaotisch; es scheint eine gewisse Ordnung zu beinhalten, lässt sich jedoch nie vorhersagen.

Regel 110



Ausschnitt des von Regel 110 generierten Musters

Warum ist das wichtig oder interessant? Es gilt zu beachten, dass das Diagramm mit einem denkbar einfachen Muster beginnt – einer einzigen, schwarzen Zelle. Der Generationsprozess besteht in der Wiederholung einer sehr einfachen Regel.⁶⁶ Von einem repetitiven, deterministischen Prozess wie diesem könnte man repetitives und vorhersehbares Verhalten erwarten. Das tatsächliche Resultat ist daher in zweierlei Weise überraschend: Zum einen ist das Ergebnis scheinbar chaotisch – dabei aber interessanter als reine Zufälligkeit, welche ebenfalls schnell einförmig wirkt. Muster der Klasse 4 weisen klar erkennbare, interessante Strukturen auf, zeugen also von Ordnung und Intelligenz. Viele von Wolframs Diagrammen sind geradezu ästhetisch.

Eine vielfach betonte Aussage Wolframs lautet: „Wenn es um komplex erscheinende Phänomene geht, wird stets geradezu selbstverständlich

davon ausgegangen, dass ihnen ebenso komplexe Mechanismen zugrunde liegen. Durch meine Entdeckung, dass simple Programme große Komplexität erzeugen können, wird klar, dass das nicht zutrifft“. ⁶⁷

Ich bin geradezu entzückt vom Verhalten der Regel 110. Dass ein völlig deterministischer Prozess völlig unvorhersehbare Ergebnisse liefern kann, ist außerdem eine Feststellung von äußerster Wichtigkeit, denn sie zeigt, dass die Welt an sich zugleich inhärent unvorhersehbar und vollständig determiniert sein kann. ⁶⁸ Völlig überrumpelt bin ich von dieser Tatsache jedoch nicht: Wir kennen ähnliche Phänomene bereits von Fraktalen, aus der Chaos- und Komplexitätstheorie, und von selbstorganisierten Systemen (wie neuronalen Netzen und Markov-Modellen), welche, auf einem simplen Netzwerk beruhend, scheinbar intelligentes Verhalten zeigen.

Auf einer anderen Ebene sehen wir, wie aus den effektiv 30 bis 100 Millionen Bytes des menschlichen Genoms unser – etwa eine Milliarde Mal komplexeres – Gehirn entsteht. ⁶⁹

Auch das Entstehen von Zufälligkeit durch einen deterministischen Prozess ist nicht völlig überraschend. Wir verfügen bereits über Zufallsgeneratoren (beispielsweise die „randomize“-Funktion in Wolframs Programm Mathematica), die mittels deterministischer Prozesse Reihen von Zufallszahlen erzeugen, die statistischen Zufälligkeitstests genügen. Diese Programme sind so alt wie Computer-Software selbst; bereits die erste Fortran-Version enthielt einen Zufallsgenerator. Wolfram liefert jedoch auch einen theoretischen Unterbau zu diesem Thema.

Wolfram zeigt weiterhin auf, dass einfache Rechenregeln in der Natur auf verschiedensten Ebenen zum Einsatz kommen und dass simple, deterministische Mechanismen den vollen Komplexitätsumfang unserer Erfahrungswelt zu erzeugen in der Lage sind. Er führt unzählige Beispiele an: ansprechende Pigmentierungsmuster von Tieren, Form und Muster von Muscheln und Strömungsverhalten (beispielsweise von Rauch in der Luft). Wolfram zufolge sind Berechnungen im Grunde simpel und allgegenwärtig, und die wiederholte Anwendung einfacher Rechenregeln ist die wahre Quelle aller Komplexität.

Nach meiner Sichtweise stimmt das nur zum Teil. Ich stimme mit Wolfram darin überein, dass wir überall von Berechnung umgeben sind, und dass so manche Muster in der Welt durch Mechanismen entstehen, die Zellulären Automaten gleichen. Doch wir müssen uns eine wichtige Frage stellen: *Wie komplex sind Automaten der Klasse 4 wirklich?*

Genau genommen drückt sich Wolfram um die Frage nach dem Ausmaß der Komplexität. Ich stimme zu, dass ein Schachbrettmuster nicht komplex ist. Wolfram erkennt auch, dass reine Zufälligkeit keine Komplexität darstellt, da sie insofern vorhersehbar ist, als dass sie keinerlei erkennbare Struktur hervorbringt. Es stimmt auch, dass die Strukturen von Klasse-4-Automaten weder repetitiv noch völlig zufällig sind, daher gebe ich auch zu, dass diese Automaten komplexer sind, als die der anderen Klassen.

Aber: Es gibt auch in Klasse 4 eine klare Grenze für die Komplexität der Automaten. All die Klasse-4-Diagramme in Wolframs Buch nehmen sich doch recht ähnlich aus und sind nur ein Stück weit interessant (und intelligent). Ihre Komplexität und ihre Strukturen entwickeln sich nicht. Die Diagramme sehen selbst nach Abermillionen von Iterationen noch ungefähr gleich aus, ohne an Komplexität zu gewinnen. Sie bringen keine Insekten oder Menschen oder Chopin-Präludien hervor – oder sonst irgendetwas, dem wir eine höhere Komplexitätsebene zuschreiben würden als den schon bekannten Streifen- und Dreieckskompositionen.

Komplexität ist ein Kontinuum. Wir haben „Ordnung“ als „Information mit Zweck“ definiert.⁷⁰ Die Ordnung eines vorhersehbaren Prozesses ist gleich null. Ein hoher Informationsgehalt bedeutet auch nicht unbedingt große Ordnung, denn ein Telefonbuch enthält massenhaft Informationen, die jedoch von geringer Ordnung sind. Eine zufällige Sequenz ist im Prinzip pure Information (da sie nicht vorhersehbar ist), hat jedoch auch keinerlei Ordnung. Das Produkt eines Automaten der Klasse 4 hat einen gewissen, gleichbleibenden Ordnungsgrad – doch die Muster, die einen Menschen ausmachen, sind von ungleich größerer Ordnung und Komplexität.

Das System Mensch hat einen äußerst anspruchsvollen Zweck, nämlich das Überleben in seiner ökologischen Nische. Es beruht auf

einer raffinierten Hierarchie verschachtelter Muster. Wolfram wirft alle Muster, die sowohl erkennbare Strukturen als auch Zufallselemente beinhalten, in einen Topf. Er zeigt dann jedoch nicht, wie sich ein Klasse-4-Automat jemals weiterentwickeln – geschweige denn ein so komplexes Muster wie den Menschen hervorbringen – könnte.

Es fehlt das Bindeglied zwischen den interessanten, aber letztendlich in ihrer Komplexität stagnierenden Mustern Zellulärer Automaten, und der Komplexität von Systemen, die höhere Intelligenz aufweisen. Klasse-4-Muster können beispielsweise keine Probleme lösen (zumindest keine von Interesse) und werden sich – auch nach noch so vielen Iterationen – nicht dahin gehend weiterentwickeln. Wolfram würde entgegen, dass Regel 110 als „Universalcomputer“ dienen kann.⁷¹ Doch auch ein Computer, der dem Universum gleicht, ist ohne die richtige „Software“ nicht in der Lage, intellektuelle Probleme zu lösen. Die höhere Komplexität, von der wir reden, steckt in ebendieser Software.

Es lässt sich noch einwenden, dass die soweit betrachteten Muster der Klasse 4 von äußerst primitiven (zweifarbigen, eindimensionalen, nur je zwei Nachbarn berücksichtigenden) Zellulären Automaten stammen. Was passiert, wenn wir die Dimensionalität erhöhen und beispielsweise mehr Farben verwenden, oder sogar von diskreten Zuständen auf stetige* Funktionen generalisieren? Auch dazu hat Wolfram ausführliche Untersuchungen angestellt und kam zu dem Ergebnis, dass komplexere Automaten im Endeffekt die gleichen Resultate liefern, wie die einfachen Automaten – nämlich interessante, aber letztendlich deutlich eingeschränkte Muster. Komplexere Regeln führen laut Wolfram selbst nicht zu komplexeren Produkten. Ich gehe sogar soweit zu behaupten, dass auch nach noch so vielen Iterationen in noch so komplexen Automaten keine zusätzliche Komplexität entstehen kann. Soviel also zu Zellulären Automaten.

Künstliche Intelligenz durch einfache Regelsysteme?

Wie kommen wir also von interessanten, aber in ihrer Komplexität stagnierenden Mustern zu Insekten, Menschen und Chopins Präludien? Eine wichtige Zutat lautet Wettbewerb – das heißt, *Evolution*. Wenn wir

Wolframs einfache Zelluläre Automaten mit einem weiteren einfachen Konzept – nämlich einem evolutionären Algorithmus – kombinieren, so erhalten wir gleich sehr viel spannendere und intelligenter Produkte. Wolfram würde sagen: Evolutionäre Algorithmen und Zelluläre Automaten sind „funktionsäquivalent“^{**}. Das stimmt jedoch nur auf der „Hardware“-Ebene. Auf der Software-Ebene dagegen besteht ein ganz klarer Unterschied in der Ordnung – also der Komplexität und Zweckmäßigkeit – der Produkte.

Der Ausgangspunkt eines evolutionären Algorithmus ist eine Menge zufällig generierter potenzieller Lösungen unseres jeweiligen Problems. Diese Lösungen übersetzen wir in digitale genetische Codes und lassen sie in einem simulierten Selektionsprozess gegeneinander antreten. Die besten Lösungen überleben und pflanzen sich durch simulierte sexuelle Reproduktion fort: Durch die Kombination des Codes von je zwei erfolgreichen Kandidaten werden Nachkommen erzeugt. Zusätzlich können wir die Lösungen noch nach jeder Reproduktion mutieren lassen. Die Aufgabe des Entwicklers besteht darin, brauchbare Werte für die „göttlichen Parameter“ (Mutationsrate, Anzahl von Nachkommen, etc.) zu finden. Ein solcher Evolutionsprozess kann dann über Tausende von Generationen simuliert werden, wobei man am Ende mit großer Wahrscheinlichkeit Lösungen von deutlich höherer Ordnung als die der Ausgangskandidaten erhält.

Evolutionäre Algorithmen (auch: „Genetische Algorithmen“) bringen mitunter elegante und intelligente Lösungen zu komplexen Problemstellungen hervor. Sie kommen beispielsweise in der Gestaltungskunst oder bei der Entwicklung künstlicher Lebensformen zum Einsatz – oder auch bei der Planung von Düsentriebwerken. Genetische Algorithmen sind ein Ansatz der „schwachen KI“ – das heißt, sie erzeugen Systeme, die eine ganz bestimmte Aufgabe erfüllen, die bislang menschliche Intelligenz erforderte.

Doch etwas fehlt immer noch. Genetische Algorithmen sind zwar bei der Lösung spezifischer Probleme von großem Nutzen, doch sie haben bislang noch nie auch nur ansatzweise „starke KI“ hervorgebracht – das heißt: künstliche Intelligenz, welche sich mit den vielseitigen, hoch

entwickelten Fähigkeiten des Menschen messen könnte, insbesondere in den Bereichen Sprache und Mustererkennung. Fehlt uns vielleicht schlichtweg die Geduld? Müssen wir der simulierten Evolution einfach mehr Zeit geben? Der Mensch ist schließlich das Produkt einer mehrere Milliarden Jahre langen Entwicklungszeit; vielleicht reichen wenige Tage und Wochen nicht aus, um diesen Prozess in einer Computersimulation nachzustellen? Dagegen spricht die Tatsache, dass gewöhnliche genetische Algorithmen grundsätzlich nach einiger Zeit eine Asymptote erreichen und dann keinerlei Fortschritte mehr machen.

Die dritte Zutat (neben der Unvorhersehbarkeit zellulärer Prozesse und dem gezielten Finden von intelligenten Lösungen durch genetische Algorithmen) für unser Intelligenz-Rezept lautet: Evolution auf mehreren Ebenen. In konventionellen genetischen Algorithmen ist die Evolution an ein eng definiertes Problem gebunden und auf ein einziges Ziel ausgerichtet. Doch auch die genetische Kodierung und die Regeln der Evolution selbst müssen sich weiterentwickeln – die Natur hat es schließlich auch nicht bei einem einzelnen Chromosom belassen; die natürliche Evolution verlief über zahlreiche Vermittlungsstufen. Außerdem ist eine ausreichend komplexe Simulationsumgebung von Nöten.

Wir können die Entwicklung starker KI jedoch abkürzen, indem wir uns die Früchte bereits stattgefundener Evolution zunutze machen und das menschliche Gehirn als Vorlage nehmen. Das Gehirn-Reverse-Engineering ist heute bereits voll im Gange, und wenn es soweit ist, können wir die Ergebnisse wiederum evolutionären Algorithmen unterziehen. Tatsächlich durchläuft auch jedes biologische Gehirn eine Evolution: Zu Beginn unseres Lebens sind Teile unseres Gehirns mehr oder weniger zufällig verdrahtet. Studien zeigen, dass sich nach der Geburt an Lernprozessen beteiligte Hirnstrukturen deutlich stärker verändern, als solche, die für die Verarbeitung von Sinneseindrücken zuständig sind.⁷²

Wolfram behauptet zurecht, dass bestimmte (genauer gesagt die meisten) Berechnungsprozesse nicht vorhersehbar sind. In anderen Worten: Wir können das zukünftige Verhalten der meisten Prozesse nicht

vorhersehen, ohne sie Schritt für Schritt ablaufen zu lassen. Die einzige Möglichkeit, das Ergebnis eines solchen Prozesses vorab zu erfahren, besteht darin, ihn irgendwie schneller zu simulieren. Unter der Annahme, dass das Universum bereits mit Höchstgeschwindigkeit läuft, erscheint es schwierig, Evolutionsprozesse auf diese Weise abzukürzen. Allerdings haben bereits mehrere Milliarden Jahre Evolution stattgefunden und die Natur mit Ordnung und Komplexität erfüllt. Wir haben nun die Werkzeuge, um die Produkte der biologischen Evolution (insbesondere das Gehirn) nachzubauen.

Es stimmt auch, dass manche komplex wirkenden Naturphänomene das bloße Produkt simpler Berechnungsmechanismen und somit durch Zelluläre Automaten darstellbar sind. Beispiele sind das (von Wolfram gern zitierte) komplizierte Dreiecksmuster auf dem Panzer der Schneckenart *Oliva porphyria* – oder der verschachtelte und vielfältige Aufbau von Schneeflocken. Diese Erkenntnis ist nicht neu; der algorithmisch anmutende, simple molekulare Entstehungsprozess von Schneeflocken ist seit Langem bekannt. Wolfram gibt solchen Prozessen und ihren Produkten nun einen theoretischen Rahmen. Doch hinter Biologie steckt mehr als Klasse-4-Automaten.

Ein anderer wichtiger Punkt bei Wolfram ist, dass er Berechnung konsequent als einen einfachen und allgegenwärtigen Teil der Welt ansieht. Dass alle Berechnungen essenziell sehr einfach sind, wissen wir seit über einem Jahrhundert: durch denkbar einfache Operationen lässt sich jede Komplexitätsebene der Informationsverarbeitung realisieren. Die gegen Ende des 19. Jahrhunderts von Charles Babagge entwickelte (und nie vollendete) mechanische Rechenmaschine verfügte über nur eine Handvoll Instruktionen und bot doch (im Rahmen ihrer Geschwindigkeit und Speicherkapazität) dieselbe Funktionalität wie moderne Computer. Die große Komplexität des Bauplans – an welcher die Umsetzung letztlich scheiterte – resultiert dabei nicht aus der Komplexität der Aufgabe, sondern war ein spezifisches Problem von Babagges Herangehensweise.

Turingmaschinen – theoretische Universalcomputer nach Alan Turing – kommen mit gerade mal sieben verschiedenen Befehlen aus und sind in

der Lage alles zu berechnen, was überhaupt irgend berechenbar ist.⁷³ Unter anderem existiert eine „universelle Turingmaschine“, die in der Lage ist, jede andere auf ihrem Speicherband beschriebene Turingmaschine zu simulieren – ein weiteres Beispiel dafür, dass Berechnung zugleich einfach und universell ist.⁷⁴ In *The Age of Intelligent Machines* erkläre ich, wie jede Art von Computer mit „einer ausreichenden Stückzahl sehr einfacher Bauteile“, nämlich „NOR-Gattern“, aufgebaut werden kann.⁷⁵ Das hat weniger theoretische Aussagekraft als die Existenz einer universellen Turingmaschine, doch wir sehen daran, dass wir mit einfachen Bauteilen (die weitaus primitiver sind als Regel 110) jegliche Art von Berechnung realisieren können, solange nur die Software stimmt (in diesem Fall die Anordnung der Bauteile).⁷⁶

Wolfram demonstriert die Einfachheit und Allgegenwart von Berechnungsprozessen – obschon die Evolution intelligenter Problemlösungen noch einige weitere Zutaten erfordert, leistete Wolfram damit einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der fundamentalen Bedeutung von Information.

MOLLY 2004: *Maschinen entwickeln sich also immer schneller – und was ist mit den Menschen?*

RAY: *Du meinst rein biologische Menschen?*

MOLLY 2004: *Ja.*

CHARLES DARWIN: *Die biologische Evolution geht weiter, oder?*

RAY: *Naja, die natürliche Entwicklung ist jetzt so langsam, das zählt kaum noch. Ich habe ja schon erklärt, dass Evolution über verschiedene Vermittlungsstufen verläuft. Dabei entwickeln sich die alten Paradigmen natürlich auch noch weiter, aber sie werden von den neuen überschattet. In der biologischen Entwicklung dauert es Zehntausende von Jahren, bis da mal eine Veränderung erkennbar wird – und ungefähr in dem Tempo lief bisher auch die Entwicklung von Kultur und Technik ab. Aber jetzt dauert es nur noch ein paar Jahrzehnte, und wir lösen uns völlig los von der natürlichen Evolution.*

Die technische Entwicklung ist jetzt schon tausend – wenn nicht Millionen – Mal schneller als die biologische.

NED LUDD: *Und was, wenn nicht jeder Lust hat, sich loszulösen?*

RAY: *Das erwartet ja auch niemand. Es gibt immer Vorreiter und Nachzügler, bei jeder Technik und bei jeder evolutionären Veränderung. Es gibt immer noch Menschen, die eigenhändig einen Pflug durch ihren Acker schieben – das tut der Verbreitung von Handys, Telekommunikation und Internet keinen Abbruch. Aber auch die letzten Nachzügler passen sich irgendwann an. Manche Länder in Afrika gehen direkt vom Agrarstaat zur Informationsgesellschaft über, ohne je eine Industrialisierung zu durchlaufen.⁷⁷*

NED LUDD: *Das mag sein, aber die digitale Schere wird immer größer. Ray: So sagt man, aber wie soll das denn bitte stimmen? Die Weltbevölkerung wächst nur sehr langsam. Die Anzahl digital vernetzter Menschen – egal wie man misst – steigt dagegen rasant an. Ein immer größerer Teil der Weltbevölkerung verfügt über elektrische Kommunikationsmittel mit drahtloser Internetverbindung – um unser vorsintflutliches Kabelnetz beneidet uns keiner mehr. Die Schere wird also kleiner, nicht größer!*

MOLLY 2004: *Ich glaube die Kluft zwischen Arm und Reich ist trotzdem ein Problem. Da muss was getan werden.*

RAY: *Das stimmt natürlich, aber im Großen und Ganzen betrachtet, wirken die Kräfte des Gesetzes vom steigenden Ertragszuwachs in die richtige Richtung. Im ersten Moment ist jede Technik unbezahlbar – und unausgereift. Irgendwann ist sie dann nur noch schweineteuer und funktioniert halbwegs. Der nächste Schritt heißt: gut und günstig – und schließlich kommt: quasi perfekt und praktisch umsonst. Vor nicht allzu langer Zeit kannte man Mobiltelefone als etwas, das reiche Leute in Filmen benutzen! Ein kritisches Beispiel ist hingegen die Entwicklung von AIDS-Medikamenten: Sie wirkten zunächst nicht besonders gut und kosteten Patienten jährlich Tausende von Dollar. Mittlerweile sind die Wirkstoffe sehr viel besser, kosten aber selbst in armen Ländern immer noch Hunderte Dollar im Jahr.⁷⁸ Perfekt und fast umsonst sind sie also leider noch nicht. Die Weltgemeinschaft*

verstärkt zwar allmählich ihre Bemühungen, doch die bisherigen Versäumnisse kosteten bereits Millionen von Menschenleben, vorwiegend in Afrika. Trotzdem: Das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs wirkt in die richtige Richtung. Und der Zeitabstand zwischen den ersten Pionieren und den letzten Nachzüglern einer Technik wird immer kürzer. Ich schätze, momentan sind es etwa zehn Jahre – und in zehn Jahren nur noch fünf.

Die Singularität als Wirtschaftsprinzip

Der Vernünftige passt sich der Welt an; der Unvernünftige versucht hartnäckig, die Welt anzupassen. Darum liegt aller Fortschritt in der Hand des Unvernünftigen.

GEORGE BERNARD SHAW, „MAXIMS FOR REVOLUTIONISTS“, *MAN AND SUPERMAN*, 1903

Aller Fortschritt beruht auf dem angeborenen Wunsch eines jeden Organismus, über seine Verhältnisse zu leben.

SAMUEL BUTLER, *NOTEBOOKS*, 1912

Wenn ich erst heute den Weg zur Westküste antreten würde, um ein neues Unternehmen zu gründen, dann würde ich mich in der Bio- und Nanotechnik umsehen.

JEFF BEZOS, GRÜNDER UND GESCHÄFTSFÜHRER VON AMAZON

Ihre Chance auf achtzig Billionen Dollar – nur für kurze Zeit

Der folgende Abschnitt beschreibt, wie man an achtzig Billionen Dollar kommt. Genaueres siehe unten. (Ja, Autoren sind sich für nichts zu schade, um den Leser bei der Stange zu halten – aber der obenstehende Satz ist mein voller Ernst. Bevor ich allerdings mit einer weiterführenden Erklärung erneut darauf zu sprechen kommen werde, sollte „man“ ihn ganz genau lesen).

Das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs ist im Grunde genommen reine Ökonomie. Derzeitige Wirtschaftstheorien und -politik basieren auf überholten Modellen, die sich hauptsächlich mit Energiekosten, Rohstoffpreisen und Investitionen in Produktionsmittel befassen. Diese Modelle ignorieren Rechenleistung, Speicherkapazität, Bandbreite,

Miniaturisierung, geistiges Eigentum, Wissen und andere zunehmend wichtige (und zunehmend zunehmende) Wirtschaftsfaktoren.

Der Wachstumsdruck* des freien Marktes ist die treibende Kraft hinter der technischen Entwicklung und dem Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs. Letzteres wirkt sich wiederum auf wirtschaftliche Zusammenhänge aus. Wachstumsdruck ist das Pendant zur natürlichen Auslese in der biologischen Evolution. Der Übergang zu immer intelligenteren und kleineren Maschinen ist das Ergebnis unzähliger kleiner Entwicklungsschritte – und jeder Einzelne davon hat wirtschaftliche Gründe. Maschinen, die ihrem Zweck besser dienen, sind von größerem Wert, und darum werden sie gebaut. Zehntausende verschiedene Projekte tragen alle auf ihre Weise zum Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs bei.

Die „Hightech“-Förderung in Unternehmen, insbesondere die Software-Entwicklung, hat – unberührt vom Konjunkturverlauf – enorm zugenommen. Als ich 1974 meine Firma für Texterkennung und Sprachsynthese (Kurzweil Computer Products) gründete, erhielten Hightech-Unternehmen in den USA weniger als dreißig Millionen Dollar aus Risikokapital-Investitionen. Mittlerweile ist dieser Betrag – trotz Hightech-Rezession (2000–2003) – um fast das Hundertfache gestiegen.⁷⁹ Um diese Entwicklung aufzuhalten, müssten wir den Kapitalismus abschaffen und jeglichen freien Wettbewerb unterbinden.

Es muss betont werden, dass die Entwicklung des „neuen“, informationsbasierten Wirtschaftssystems zwar exponentiell verläuft, aber dennoch ihre Zeit braucht.⁸⁰ Viele betrachteten die sogenannte „New Economy“ als gescheitert, weil sie das Wirtschaftssystem nicht über Nacht revolutionierte. In der Tat wird es noch einige Jahrzehnte dauern, bis Wirtschaft vollständig von Wissen bestimmt ist – schließlich handelt es sich dabei um einen äußerst fundamentalen Wandel.

So sind auch die Börsenschwankungen im Bereich Internet und Telekommunikation zu erklären. Die Boom-Phasen resultierten aus der (durchaus richtigen) Vorahnung, dass mit Internet und mobilen Kommunikationsgeräten eine neue Ära anbricht. Doch was den Zeitrahmen betrifft waren die Erwartungen der Spekulanten völlig unrealistisch, und so wurden über zwei Billionen Dollar Kapital vernichtet. Wie wir gleich sehen

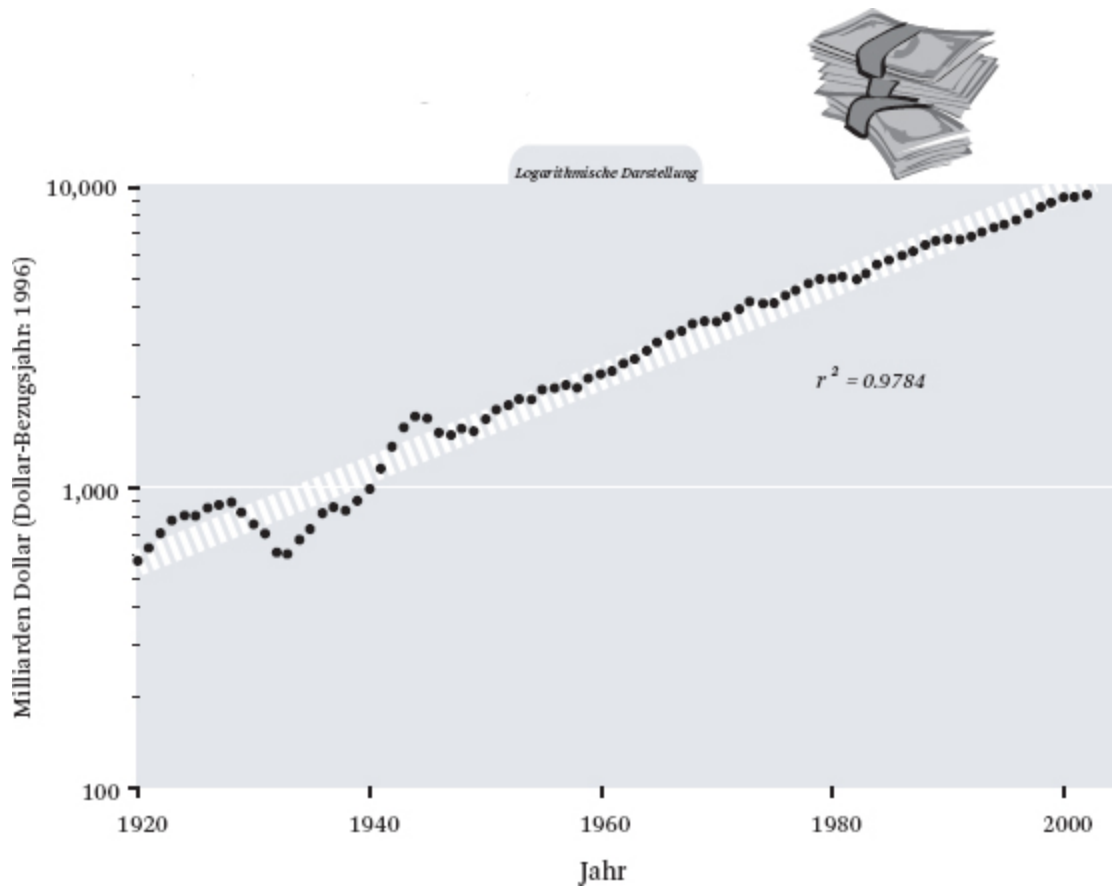
werden, verlief die reale Entwicklung der Kommunikationstechnik völlig gleichmäßig – unbeeindruckt von allen Börsenturbulenzen.

Praktisch alle gebräuchlichen Wirtschaftsmodelle sind fehlerhaft, was langfristige Entwicklungen betrifft – Modelle, die an Schulen unterrichtet werden und die Grundlage für Entscheidungen der US-Zentralbank, staatliche Wirtschaftspolitik, sowie für alle möglichen wirtschaftlichen Prognosen bilden. Ihr Manko besteht darin, dass sie auf der „intuitiv-linearen“ Geschichtsbetrachtung beruhen (also auf der Annahme, dass die Fortschrittsrate gleichbleibend ist), anstatt auf der historisch korrekten, exponentiellen Betrachtung. Diese fehlerhaften Modelle sind aus demselben Grund erfolgreich, aus dem die meisten Menschen die intuitiv-lineare Perspektive einnehmen: Exponentielle Veränderungen erscheinen linear, wenn man sie nur für kurze Zeit verfolgt, insbesondere in einem frühen Stadium, in dem sich noch relativ wenig tut. Doch sobald die „Biegung der Kurve“ erreicht ist und das Wachstum explodiert, versagen lineare Modelle.

Zum Zeitpunkt der Entstehung dieses Buches wird in den USA über eine Sozialreform debattiert, anhand von Prognosen, die bis ins Jahr 2042 reichen – etwa der Zeitraum, für den ich die Singularität erwarte (siehe nächstes Kapitel). Eine in der Politik ungewohnt vorausschauende Planung. Die diskutierten Prognosen nehmen jedoch für Lebenserwartung und Wirtschaft lineare Steigerungsraten an und sind somit extrem unrealistisch. Einerseits wird die Lebenserwartung die kühnsten Träume der Politiker übersteigen. Andererseits werden die Menschen nicht mehr mit fünfundsechzig in Rente gehen, wenn sie körperlich und geistig so fit sind wie ein Dreißigjähriger. Vor allem aber wird das Wachstum des „GNR“-Sektors (siehe **Kapitel 5**) weit über den veranschlagten 1,7 Prozent liegen (welche selbst das Wachstum der letzten fünfzehn Jahre um die Hälfte unterschätzen).

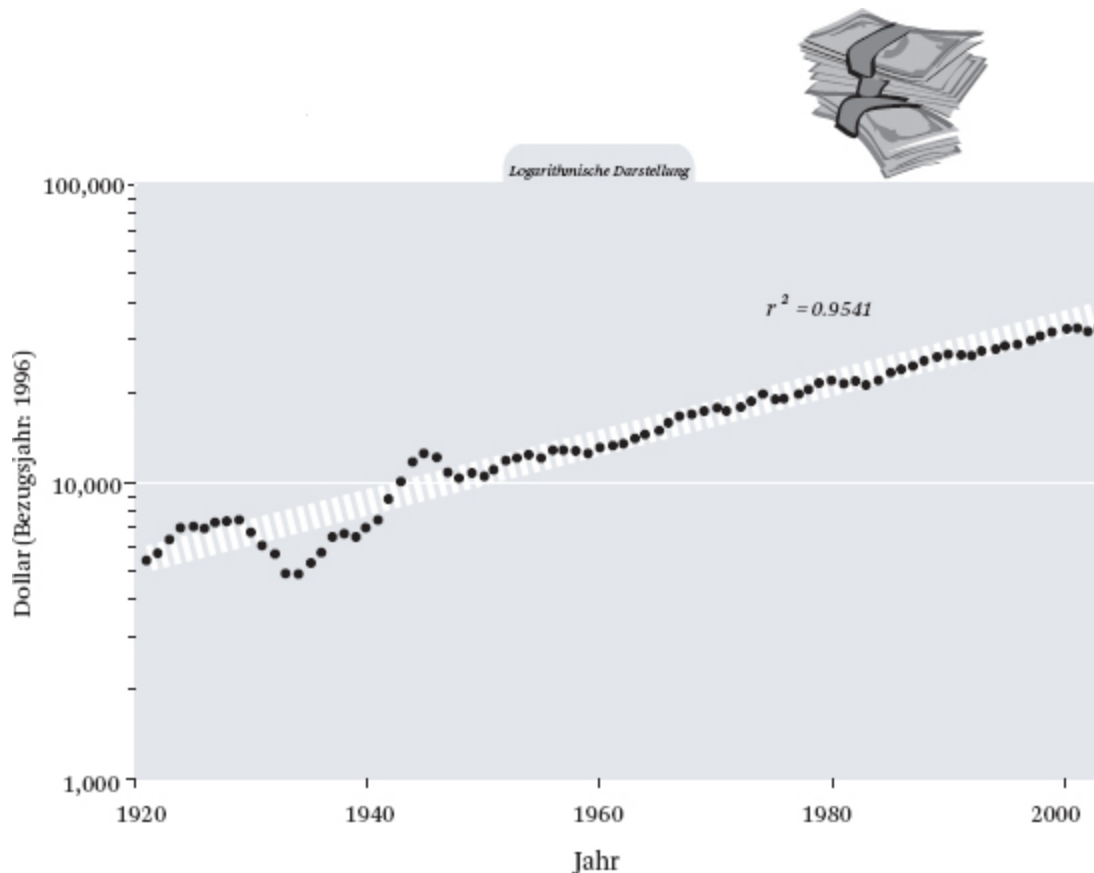
Die für das Wirtschaftswachstum verantwortlichen exponentiellen Prozesse treten gerade erst in die explosive Phase ein. Wie wir in der untenstehenden Abbildung sehen, wächst das reale Bruttoinlandsprodukt (BIP) der USA – dank technischer Produktivitätssteigerung – exponentiell.⁸¹

Reales Bruttoinlandsprodukt der USA



Manche Kritiker begründen die exponentielle Steigerung des BIP durch die Bevölkerungsexplosion, doch auf Pro-Kopf-Basis sehen wir dieselbe Entwicklung (siehe untenstehende Abbildung).⁸²

BIP pro Kopf



Das exponentielle Wirtschaftswachstum wiegt insgesamt schwerer als die regelmäßig auftretenden Konjunkturschwächen. Wirtschaftsrezessionen und auch -depressionen sind im Prinzip lediglich temporäre Schwankungen der Kurve – das gilt selbst für die Weltwirtschaftskrise: Nach jeder Rezession/Depression erholt sich die Wirtschaft wieder genau bis zu dem Stand, den sie auch bei gleichmäßigem Verlauf erreicht hätte.

Das globale Wirtschaftswachstum wird immer schneller. Die Weltbank veröffentlichte Ende 2004 einen Bericht, dem zufolge das zurückliegende Jahr mit einem weltweiten Wachstum von 4 Prozent das wirtschaftlich erfolgreichste Jahr aller Zeiten war.⁸³ Entwicklungsländer verzeichneten dabei mit über 6 Prozent das stärkste Wachstum – ohne China und Indien immer noch über 5 Prozent. In Ostasien und der Pazifikregion sank die Anzahl extrem armer Menschen zwischen 1990 und 2001 von 470

Millionen auf 270 Millionen und wird nach Hochrechnungen der Weltbank 2015 unter 20 Millionen liegen. In anderen Regionen ist das Wirtschaftswachstum vergleichbar, wenn auch nicht ganz so hoch.

Die Produktivität (Wirtschaftsleistung pro Arbeiter) ist ebenfalls exponentiell gewachsen – dabei bleibt die gestiegene Qualität von Produkten und Service noch weitgehend unberücksichtigt. Ein Auto ist nicht gleich ein Auto: Sicherheit, Zuverlässigkeit und Ausstattung werden mit der Zeit immer besser. Ein Computer für tausend Dollar ist heute deutlich (mehr als tausend Mal) leistungsfähiger als vor zehn Jahren. Es gibt unzählige weitere Beispiele. Pharmazeutische Wirkstoffe werden immer effizienter, da sie immer präziser in die Stoffwechselvorgänge von Erkrankungs- und Alterungsprozessen eingreifen und weniger Nebenwirkung verursachen. (Die meisten auf dem Markt befindlichen Medikamente spiegeln diese Entwicklung allerdings noch nicht wieder; siehe **Kapitel 5**). Ein Produkt, das man in fünf Minuten online bestellen kann, und das an die Tür geliefert wird, ist mehr wert, als eines, das man selbst abholen muss. Maßgeschneiderte Kleidung ist mehr wert als Klamotten von der Stange. Derartige Verbesserungen finden sich in fast allen Produktkategorien, bleiben jedoch von Produktivitätsstatistiken weitgehend unberücksichtigt.

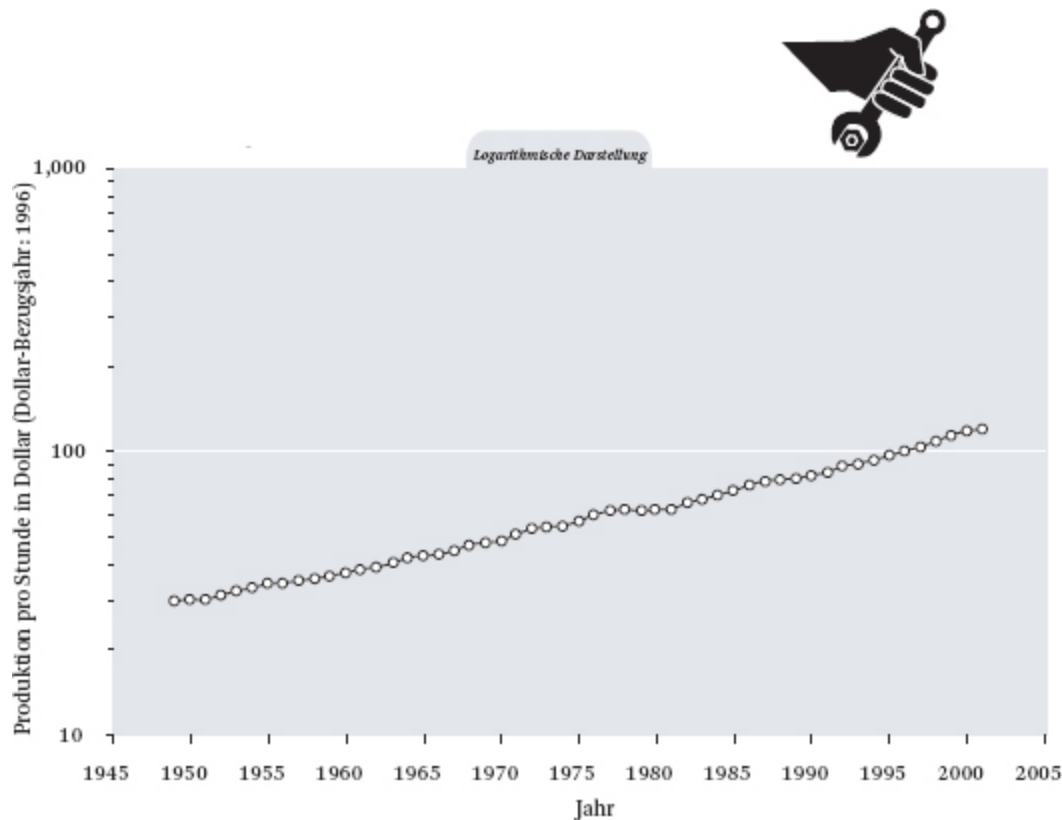
Die üblichen Bemessungsmethoden für Produktivität ignorieren wichtige Wachstumsfaktoren, indem sie davon ausgehen, dass man für einen Dollar nach wie vor auch nur Leistungen im Wert von einem Dollar erhält – dabei bekommt man doch immer mehr für sein Geld. (Computer sind das Paradebeispiel dafür, es gilt jedoch in allen Bereichen). Die Professoren Mark Bilal (University of Chicago) und Pete Klenow (University of Rochester) schätzen, dass aufgrund von Qualitätssteigerungen der Wert existierender Waren in Basisdollar über die letzten zwanzig Jahre um jährlich 1,5 Prozent gestiegen ist.⁸⁴ Nicht einberechnet sind dabei völlig neuartige Produkte und Produktkategorien (beispielsweise Handys, Pager, tragbare Computer, Musikdownloads und Softwareprogramme), sowie der Wert der weltweiten Vernetzung an sich. Wie bemisst man den Wert frei verfügbarer Online-Enzyklopädien und Suchmaschinen, die uns Zugang zum Wissensschatz der Menschheit gewähren?

Das Statistikamt des U.S.-Arbeitsministeriums geht bei der Berechnung von Inflationsraten von nur 0,5 Prozent jährlicher Qualitätssteigerung aus.⁸⁵ Angesichts der (vorsichtigen) Schätzung von Klenow und Bils ist das eine grobe Unterschätzung beziehungsweise eine Überschätzung der jährlichen Inflationsrate um 1 Prozent – wie gesagt, selbst ohne die neuen Produktkategorien zu berücksichtigen.

Trotz dieser statistischen Unzulänglichkeiten erreicht auch der offiziell errechnete Produktivitätszuwachs nun den steilen Teil der Kurve. Die Arbeitsproduktivität wuchs bis 1994 jährlich um 1,6 Prozent, später um 2,4 Prozent, und steigt mittlerweile noch schneller. Die Produktivität pro Stunde stieg zwischen 1995 und 1999 um jährlich 4,4 Prozent; bei Gebrauchsgütern sogar um 6,5 Prozent. Im ersten Quartal 2004 betrug die saisonbereinigte jährliche Produktivitätssteigerung 4,6 Prozent im Firmenbereich und 5,9 Prozent bei Gebrauchsgütern.⁸⁶

Der durch eine Stunde Arbeit erzeugte Wert ist über das letzte halbe Jahrhundert konsequent exponentiell gestiegen (siehe untenstehende Abbildung). Dabei ist – wie gesagt – die massive Zunahme (jährliche Verdopplung!) des Preis-Leistungs-Verhältnisses von Informationstechnik noch nicht mitberücksichtigt.⁸⁷

Private Fertigung Produktion pro Stunde



Ist Deflation schlecht?

1846 gab es im ganzen Land wohl kein einziges von Maschinen genähtes Gewand; es war das Jahr, in dem das erste amerikanische Patent für Nähmaschinen angemeldet wurde. Mittlerweile kleiden sich Tausende in die Nähereien eiserner Finger, die mit der Geschicklichkeit einer Kaschmirjungfer zu Werke gehen.

SCIENTIFIC AMERICAN, 1853

Derzeit fürchten sich viele Ökonomen – aus dem rechten wie dem linken Lager – vor einer Deflation. Auf den ersten Blick erscheint es eigentlich erfreulich, wenn man mehr bekommt für sein Geld. Die Sorge der Wirtschaftsexperten ist, dass die Wirtschaft (in Dollar gemessen) schrumpft, wenn die Konsumenten ihre Bedürfnisse für weniger Dollars erfüllen können. Dabei machen sie die Rechnung jedoch ohne die Unersättlichkeit

der Konsumgesellschaft. Die Umsätze der Halbleiterindustrie sind im letzten halben Jahrhundert jährlich um 17 Prozent gestiegen, obwohl dieser Sektor unter einer Deflation von 40 bis 50 Prozent „leidet“.⁸⁸ Solange die Wirtschaft faktisch zulegt, sollten die theoretischen Auswirkungen der Deflation kein Grund zur Beunruhigung sein.

Die 1990er und 2000er Jahre waren geprägt von den bislang stärksten Deflationskräften der Geschichte, weshalb derzeit keine nennenswerte Inflation stattfindet. Es stimmt zwar, dass geringe Arbeitslosigkeit, hohe Vermögenswerte und Wirtschaftswachstum historisch betrachtet stets mit Inflation einhergehen, doch dem wirkt das exponentielle Wachstum des Informationswesens entgegen – also die Zunahme in Rechenleistung, Speicher, Kommunikation, Biotechnik, Miniaturisierung, sowie der Fortschrittsrate selbst. Diese Größen haben massiven Einfluss auf alle Industriezweige. Vertriebswege verkürzen sich durch zunehmende Vernetzung und Kommunikationstechnik; Verwaltungs- und Betriebsabläufe werden effizienter.

Die massiven Deflationsraten in der Informationsindustrie wirken sich ebenfalls auf alle Wirtschaftsbereiche aus. Die Deflation während der Weltwirtschaftskrise in den 1930ern war auf verunsicherte Konsumenten und fallende Einnahmen zurückzuführen. Die heutige Deflation ist ein völlig anderes Thema: Sie folgt aus der rapiden Produktivitätssteigerung und dem in jeglicher Hinsicht wachsenden Informationswesen.

Alle Diagramme in diesem Abschnitt zeugen von massiver Deflation. Es gibt unzählige Beispiele für gesteigerte Effizienz. Amoco gibt im Jahr 2000 für das Auffinden von Ölreserven weniger als einen Dollar pro Barrel aus, 1991 waren es noch fast zehn Dollar. Eine Onlineüberweisung kostet Banken einen Penny, eine Überweisung am Schalter dagegen über einen Dollar.

Die Nanotechnik wird schließlich die Wirtschaftlichkeit der Software auf die Hardware (also auf physische Produkte) übertragen – und die Deflation von Softwarepreisen schreitet sogar noch schneller voran, als die der Hardware (siehe untenstehende Tabelle).

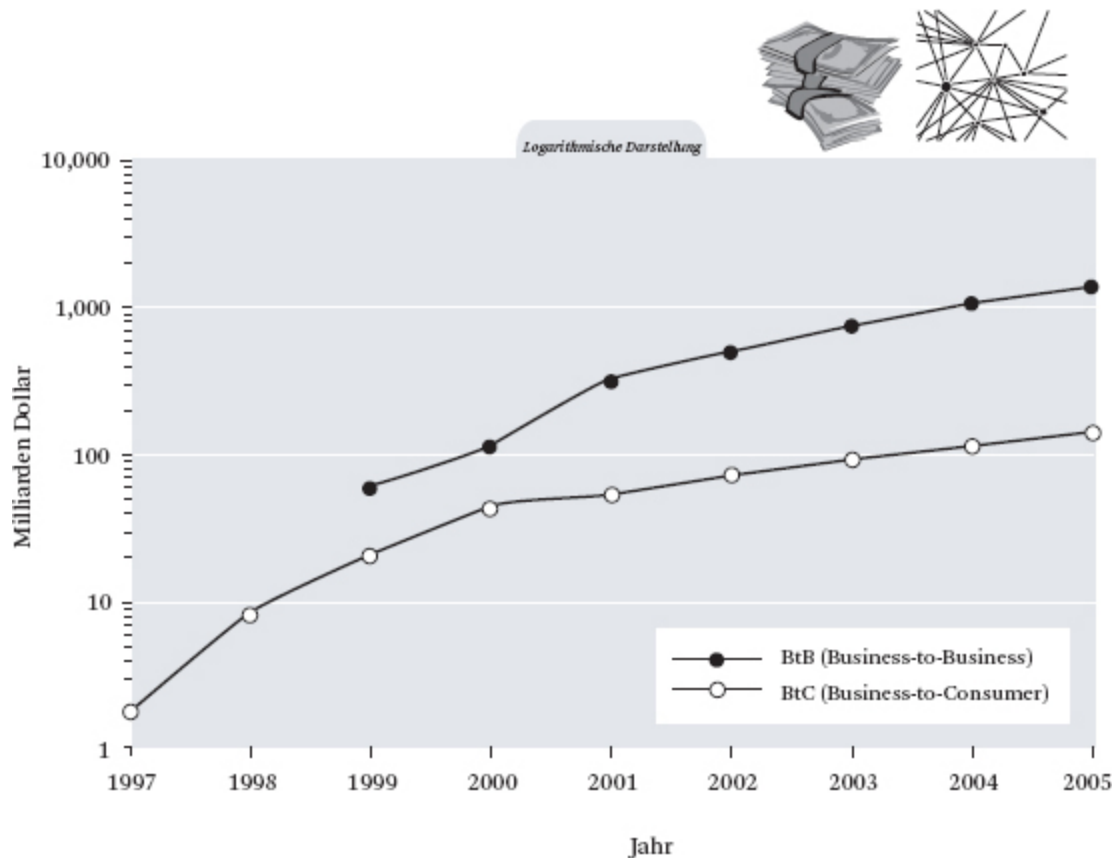
Exponentielle Preis-Leistungs-Steigerung⁸⁹ **Bespiel Spracherkennungssoftware**

	1985	1995	2000
Preis	\$5 000	\$500	\$50
Vokabular (Wortanzahl)	1 000	10 000	100 000
Fortlaufende Rede?	Nein	Nein	Ja
Erforderliche Einarbeitung des Benutzers (Minuten)	180	60	5
Treffgenauigkeit	Mangelhaft	Ausreichend	Gut

Am deutlichsten sind die Auswirkungen verteilter und intelligenter Kommunikationstechnik wohl in der Geschäftswelt zu spüren. Trotz aller Launen der Börse steckte hinter den in den 1990ern in den Himmel schießenden Kursen sogenannter Dotcom-Unternehmen ein richtiger Gedanke: Geschäftsmodellen, die sich über die letzten Jahrzehnte bewährt haben, steht ein radikaler Wandel bevor. Geschäftsmodelle der Zukunft werden auf direkte, personalisierte Kommunikation mit dem Kunden setzen und alle Industriezweige verändern. Hürden, die zwischen Kunden und Produzenten oder Dienstleistern standen, werden abgebaut. Doch jede Revolution braucht ihre Zeit, und in den 1990ern überstiegen die Investitionen und Kursentwicklungen bei Weitem das Wachstum des in der frühen Phase der S-Kurve befindlichen E-Kommerz-Sektors.

Das resultierende Auf und Ab der Aktienwerte war ein reines Börsenphänomen – es spiegelt sich weder in den Business-to-Consumer-Daten (BtC) noch in den Business-to-Business-Daten (BtB) (siehe untenstehende Abbildung). Die tatsächlichen BtC-Einnahmen stiegen zwischen 1997 und 2002 völlig gleichmäßig von 1,8 Milliarden auf 70 Milliarden Dollar. Ähnlich gleichmäßig war das BtB-Wachstum zwischen 1999 und 2002 von 56 Milliarden auf 482 Milliarden Dollar – 2004 nähert es sich der Eine-Billion-Dollar-Marke.⁹⁰ Dass auch die zugrunde liegende Informationstechnik keinerlei Konjunkturschwankungen kennt, haben wir schon zuvor erschöpfend diskutiert.

E-Kommerz-Einnahmen in den USA



Der immer bessere Zugang zu Informationen verändert auch Machtverhältnisse: Immer mehr Patienten betreten die Arztpraxis bereits mit detailliertem Wissen über ihren Befund und die Therapieoptionen. Automatische Software-Assistenten helfen Konsumenten, in kurzer Zeit preislich und ausstattungsmäßig optimale Produkte auszuwählen – von Toastern und Autos über Immobilien bis zu Bankkonten und Versicherungen. Webseiten wie eBay bringen in noch nie da gewesener Weise Käufer und Verkäufer zusammen.

Geschäftsabläufe sind immer mehr von den (oft unbewussten) Wünschen und Bedürfnissen der Kunden bestimmt. Käufer von Kleidung müssen sich nicht länger damit zufriedengeben, was im Laden auf der Stange hängt. Stattdessen werden sie bald verschiedene Stoffe und Schnitte auf einem

(präzise gescannten) 3D-Modell ihres Körpers ausprobieren und Kleidungsstücke nach ihren genauen Wünschen anfertigen lassen.

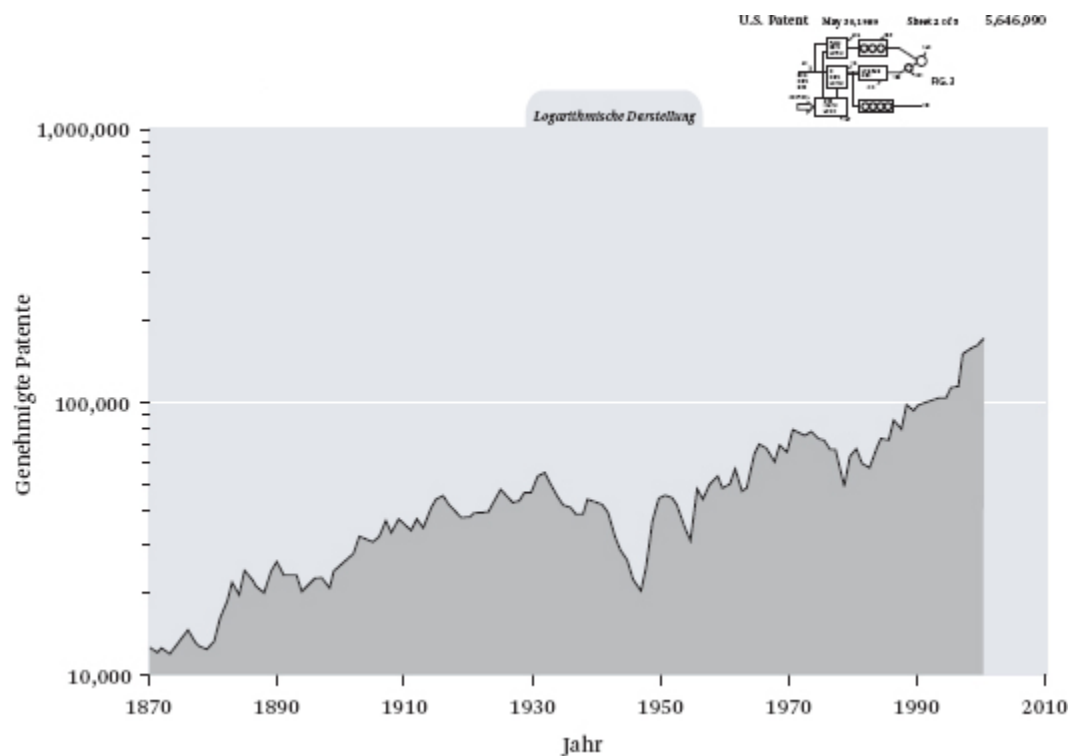
Die bisherigen Defizite des Onlinehandels (etwa unflexible Benutzeroberflächen anstelle von Verkaufspersonal; oder die fehlende Möglichkeit, Produkte zu testen) werden mit der Zeit ausgebügelt werden – der Trend geht in Richtung elektronische Welt.

Gegen Ende des Jahrzehnts werden Computer als physische Einzelobjekte verschwinden. Sie werden ersetzt durch Brillendisplay und in Kleidung verwobene Elektronik – und ein völliges Eintauchen in die virtuelle (visuelle) Realität ermöglichen. Der „Besuch einer Webseite“ bedeutet dann das Betreten einer (zumindest was Bild und Ton betrifft) virtuellen Realitätsumgebung, in der wir direkt mit (realen und simulierten) Personen und Produkten interagieren. Simulierte Personen werden zwar – zumindest 2009 – nicht mit echten Menschen vergleichbar sein, aber durchaus genügen als Verkäufer, Auskunftspersonal oder wissenschaftlicher Assistent. Haptische* Benutzeroberflächen werden es uns ermöglichen, virtuelle Produkte und Personen auch zu berühren. Es wird schwer werden, noch Vorzüge des Ladens an der Ecke zu finden, welche die interaktiven Oberflächen der Zukunft nicht bieten können.

Diese Entwicklungen haben ernste Konsequenzen für die Immobilienindustrie, denn es wird immer unnötiger, Mitarbeiter in Büros zu versammeln. Ich spreche aus eigener Erfahrung: In meinen eigenen Unternehmen arbeiten wir in geografisch weit verstreuten Teams zusammen – das war vor zehn Jahren noch deutlich schwieriger. Simulierte Klang- und Ton-Umgebungen werden im zweiten Jahrzehnt des Jahrhunderts überall Verbreitung finden und den Menschen zunehmend ermöglichen, zu leben und zu arbeiten, wo immer sie wollen. Sobald virtuelle Umgebungen alle Sinne umfassen – gegen Ende der 2020er – gibt es keinen Grund mehr Büros zu benutzen. „Real estate“* wird virtuell.

Schon Sun Tsu wusste: „Wissen ist Macht“ – und eine der Auswirkungen des Gesetzes vom steigenden Ertragszuwachs ist das exponentielle Wachstum des Wissens der Menschheit sowie des geistigen Eigentums.

Genehmigte US-Patente⁹¹



All das heißt nicht, dass es ab sofort keine Rezessionen mehr gibt. In letzter Zeit kam es zu einer Verlangsamung des Wirtschaftswachstums der USA und zu einem Abschwung im Techniksektor – und zu einer allmählichen Erholung. Das Land hat immer noch mit den gleichen Problemen zu kämpfen, die in der Vergangenheit regelmäßig für Rezessionen sorgten: Überinvestitionen in kapitalintensive Projekte und Inventar-Überbestückungen. Schnelle Informationsverbreitung, elektronische Beschaffungssysteme und immer transparentere Märkte in allen Industriezweigen schwächen jedoch die zyklisch wiederkehrenden Rezessionen ab, somit kommt es immer unwahrscheinlicher zu spürbaren Auswirkungen auf den Lebensstandard. Das war in der Minirezession 1991–1993 zu sehen und noch deutlicher in der jüngsten Rezession der frühen 2000er.

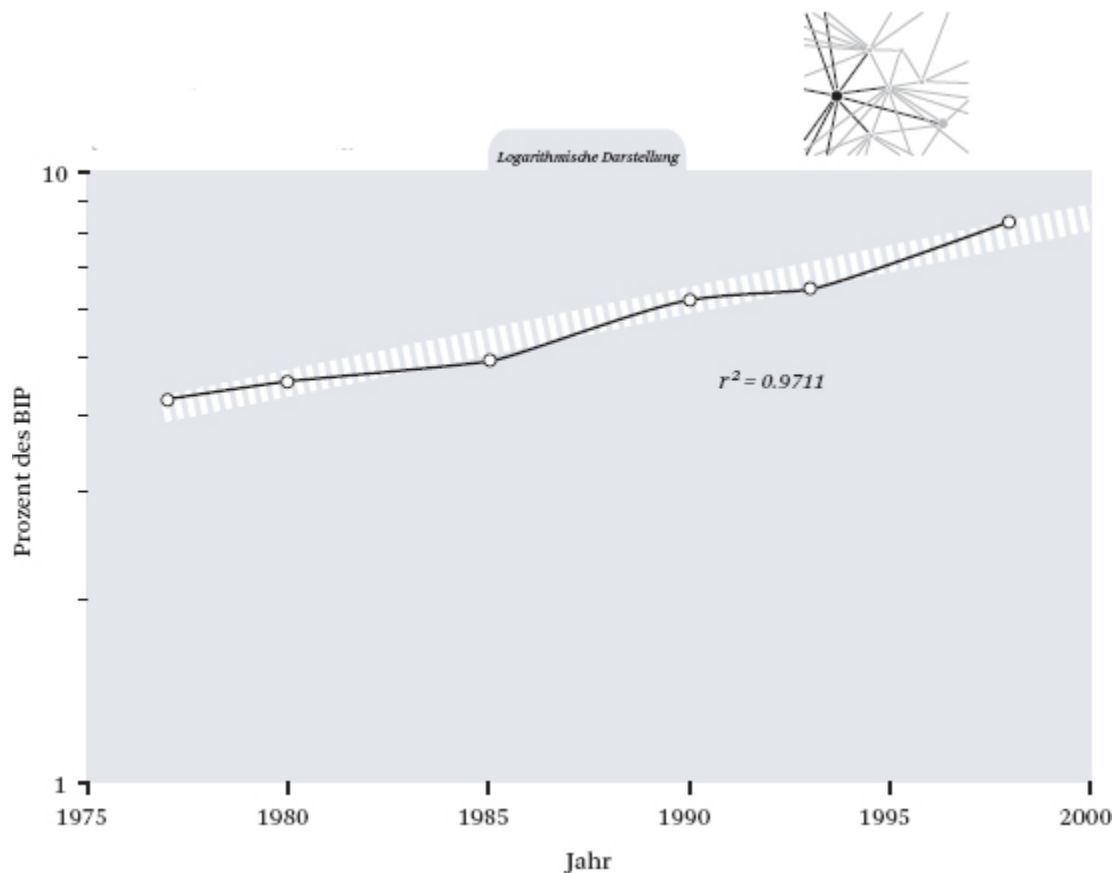
Davon abgesehen haben Konjunkturschwankungen keine erkennbaren Auswirkungen auf Innovation und Paradigmenwechsel: Das exponentielle Wachstum der in den Diagrammen erfassten Technikbereiche litt nicht im

Geringsten unter den jüngsten Verlangsamungen des Wirtschaftswachstums. Auch die Verkaufszahlen neuer Produkte blieben unberührt von Wirtschaftshochs und -tiefs.

Das langfristige Wirtschaftswachstum zeugt von neuen Formen und Ebenen von Wert und Wohlstand, die zuvor nicht existierten, oder zumindest keinen nennenswerten Teil der Wirtschaft ausmachten. Da wären unter anderem neue Materialien aus Nanopartikeln, genetische Informationen, geistiges Eigentum, Kommunikationsportale, Webseiten, Bandbreite, Software, Datenbanken und viele weitere Kategorien.

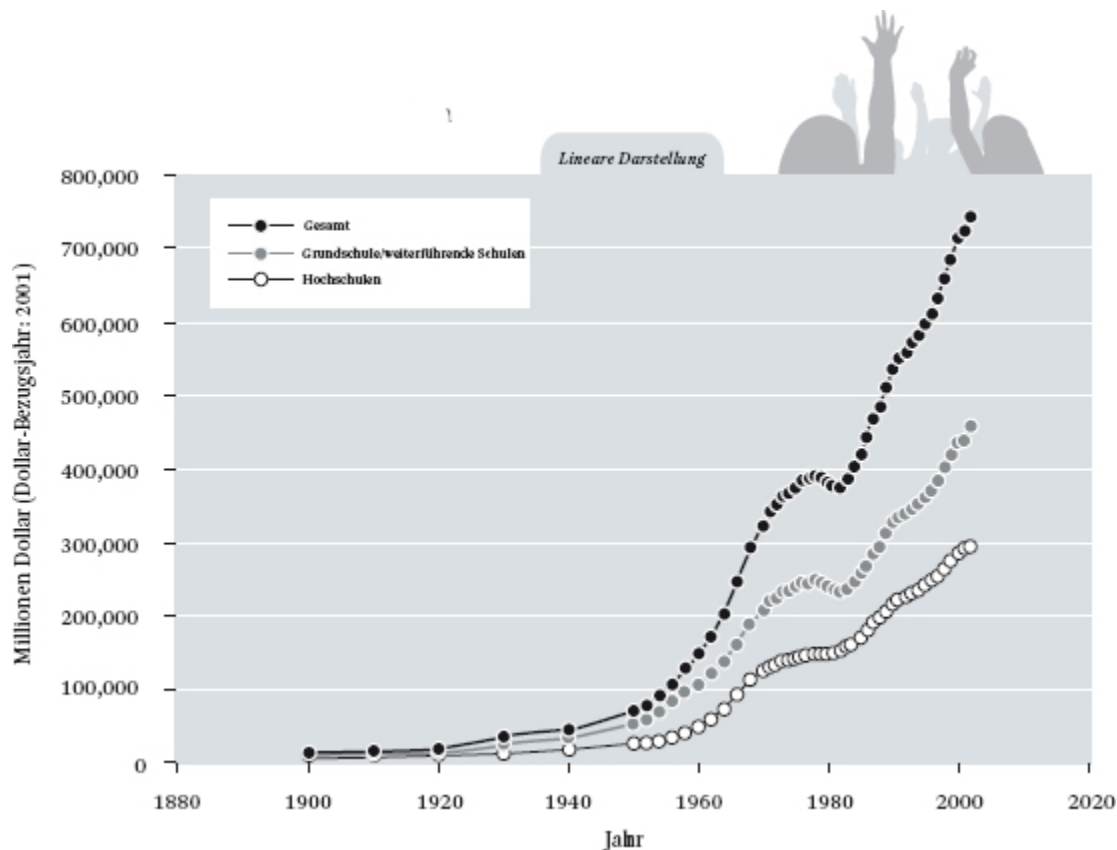
Der Sektor Informationstechnik macht einen immer größeren Teil der Wirtschaft aus und hat immer mehr Einfluss auf alle anderen Bereiche – siehe untenstehende Abbildung.⁹²

Anteil des IT-Sektors an der US-Wirtschaft



Das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs gilt auch im Bereich Bildung und Lernen. Über die letzten 120 Jahre haben wir die Investitionen in K-12-Bildung* (in Basisdollar pro Schüler) verzehnfacht. Die Anzahl von College-Studenten hat sich verhundertfacht. Die Automatisierung ist nicht nur eine Erweiterung unserer Muskelkraft, sondern auch unserer geistigen Fähigkeiten. In den letzten zwei Jahrhunderten sind durch die Automatisierung Arbeitsplätze weggefallen, die geringe Qualifikation erfordern – dafür sind neue (besser bezahlte) Jobs für höher qualifizierte Arbeitskräfte entstanden. Das Qualifikationsspektrum bewegt sich also insgesamt in Richtung höherer Qualifikation, und dementsprechend steigen auch die Bildungsausgaben auf allen Ebenen exponentiell (siehe die Abbildung auf der folgenden Seite).⁹³

US-Bildungsausgaben



Was nun die reißerische Überschrift dieses Abschnitts betrifft: Aktienwerte basieren auf Erwartungen an die Zukunft. Da diese Erwartungen im Allgemeinen auf der (buchstäblich) kurzsichtigen intuitiv-linearen Perspektive beruhen, ist das wirtschaftliche Potenzial massiv unterbewertet. Da Aktienwerte durch Angebot und Nachfrage bestimmt sind, spiegeln sie die allgemein vorherrschende Erwartung eines linearen Wirtschaftswachstums wieder. Doch die Prinzipien des Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs besagen eindeutig, dass die Wirtschaft exponentiell weiterwächst, da der Fortschritt immer schneller vonstatten geht.

MOLLY 2004: *Moment mal – am Anfang war hier von der „Achtzig-Billionen-Dollar-Chance“ die Rede!*

RAY: *Ganz richtig. Wenn wir meinen Modellen entsprechend die ganzen linearen Prognosen durch exponentielle ersetzen, sollten sich die Aktienpreise verdreifachen.⁹⁴ Da momentan (vorsichtig geschätzt) ungefähr vierzig Billionen Dollar in Aktien angelegt sind, ergibt das achtzig Billionen zusätzlich.*

MOLLY 2004: *Aber ich dachte, ich bekomme die Kohle?*

RAY: *Nein, da steht: „wie man an achtzig Billionen Dollar kommt“. Mit „man“ meinte ich natürlich uns alle.*

MOLLY 2004: *Sehr witzig, wirklich. Also die gesamte Menschheit oder was? Die Menschen werden aber nicht alle dieses Buch lesen!*

RAY: *Aber sie könnten es theoretisch tun.* Und würden alle das Buch lesen und verstehen und ihre Erwartungen in die Wirtschaft dem historisch-exponentiellen Modell anpassen – dann würden die Aktienkurse schlagartig ansteigen.*

MOLLY 2004: *Du meinst, wenn es alle lesen würden und einverstanden wären. Persönliche Überzeugungen bestimmen den Markt, oder etwa nicht?*

RAY: *Okay, davon bin ich jetzt mal ausgegangen.*

MOLLY 2004: *Du glaubst also, dass das wirklich passiert?*

RAY: Ehrlich gesagt nein. Womit wir wieder beim Thema Zukunft wären: Ich denke, auf die Dauer setzt sich die historisch-exponentielle Denkweise durch – aber erst in einiger Zeit, wenn sich die exponentiellen Entwicklungen in Wirtschaft und Technik noch deutlicher abzeichnen. Im nächsten Jahrzehnt wird sich allmählich etwas tun in den Köpfen der Menschen, was wiederum einen starken, dauerhaften Aufwind für die Märkte bedeutet.

GEORGE 2048: Ich weiß nicht, Ray. Mit der Preis-Leistung von Informationstechnik hattest du recht: die ist in jeglicher Hinsicht exponentiell weitergewachsen. Die Wirtschaft ebenso, trotz sehr hoher Deflation. Die Menschen haben das dann natürlich auch irgendwann realisiert – allerdings ohne großartige Auswirkungen auf dem Aktienmarkt. Die Kurse sind dem Wirtschaftswachstum entsprechend gestiegen, die allgemeine Einsicht der steigenden Wachstumsraten hatte aber keine großartigen Auswirkungen.

RAY: Und woran, glaubst du, liegt das?

GEORGE 2048: Du hast eine Kleinigkeit übersehen: Die Anleger haben zwar einerseits kapiert, dass die Aktien steigen, andererseits aber auch, dass parallel dazu der Abzinsungsfaktor größer wird. (Der Abzinsungsfaktor spiegelt die Tatsache, dass eine Zahlung mehr wert ist, je früher man sie erhält). Überleg mal: Wenn den Leuten klar wird, dass die Aktien steigen, wollen sie auch alle welche haben und Gewinn machen, und zwar lieber früher als später. Dadurch steigt natürlich auch der Abzinsfaktor, was die gesteigerten Erwartungen in den Anlagewertzuwachs ausgleicht.

MOLLY 2104: Ähm, das stimmt jetzt aber auch nicht ganz, George. Das ist zwar alles logisch, aber die psychologische Realität sah dann doch anders aus. Der positive Effekt der veränderten Erwartungen an die Aktienkurse war deutlich stärker als der negative Abzinsungseffekt. Die allgemeine Akzeptanz exponentieller Wachstumsraten in Technik und Wirtschaft hat somit tatsächlich die Anlagemärkte gestärkt – allerdings nicht verdreifacht, wie du geschrieben hast, Ray, aufgrund des von George angesprochenen Effekts.

MOLLY 2004: *Okay, tut mir leid, dass ich gefragt habe. Ich bleibe erstmal bei meiner Handvoll Aktien und zerbreche mir nicht den Kopf.*

RAY: *Worin hast du denn investiert?*

MOLLY 2004: *Mal überlegen... Also, erstmal diese Suchmaschine mit natürlicher Sprache, die Google ablösen will, dann Brennstoffzellen und dann noch ein Unternehmen für Sensoren, die in der Blutbahn herumschwimmen.*

RAY: *Klingt nach einem risikofreudigen Hightech-Portfolio.*

MOLLY 2004: *Portfolio ist übertrieben. Ich versuche einfach ein bisschen auf die Zukunftstechnik zu setzen, von der du immer erzählst.*

RAY: *Okay, aber vergiss nicht: Auch wenn alle kommenden technischen Entwicklungen genau dem Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs entsprechen, können wir noch lange nicht wissen, welcher Konkurrent sich in den jeweiligen Marktsparten durchsetzt.*

MOLLY 2004: *Ja, deshalb hab ich die Anlagen ja auch aufgeteilt.*

KAPITEL 3

Wann Computer die Rechenkapazität des Menschen erreichen

Wie in *Engines of Creation* beschrieben, gibt es, falls man echte KI konstruieren kann, Gründe zur Annahme, dass man Dinge wie Neuronen bauen kann, die Millionen Mal schneller sind. Daraus folgt, dass Systeme möglich sind, die millionenfach schneller denken als ein Mensch. Mit KI ausgestattet könnten solche Systeme wiederum neue Systeme entwickeln. Und wenn sie dabei fähig sind, etwas zu erschaffen, dass besser ist als sie selbst, könnte das zu einem abrupten Einschnitt führen. Diese Situation ist vielleicht noch viel problematischer als die Nanotechnik, doch es ist auch sehr viel schwerer, zum jetzigen Zeitpunkt überhaupt konstruktiv darüber nachzudenken. Darum steht sie nicht im Mittelpunkt meiner Ausführungen, ich zeige nur regelmäßig mit dem Finger darauf und sage: „Das ist auch wichtig“.

ERIC DREXLER, 1989

Das sechste Paradigma der Rechnertechnik: Dreidimensionale Molekularchips und neue Berechnungsmethoden

In der *Electronics*-Ausgabe vom 19. April 1965 schrieb Gordon Moore: „Die Zukunft von Mikrochips ist die Zukunft der Elektronik. Die Vorteile der Chiptechnik werden der Elektronik zu einem Aufschwung verhelfen und diese Wissenschaft in viele neue Bereiche tragen“.¹ Mit diesen bescheidenen Worten rief Moore eine Revolution aus, die noch heute immer weiter Fahrt aufnimmt. Um seinen Lesern zu verdeutlichen, welche fundamentale Bedeutung besagter neuer Wissenschaft zukommt, behauptete er, dass „im Jahre 1975 die Kräfte des Marktes möglicherweise diktieren, bis zu 65.000 Komponenten auf einen einzigen Siliziumchip zu quetschen.“ Stellen Sie sich das nur vor.

Moore's Artikel beschrieb, wie sich die Anzahl der Transistoren (die als logische Einheiten, sogenannte „Gatter“, dienen), die auf einen Chip passen, wiederholt innerhalb eines Jahres verdoppelt hatte. Sein 1965 aufgestelltes „Moore'sches Gesetz“ wurde damals heftig kritisiert, da es für die exponentielle Verlaufslinie der Anzahl von Komponenten pro Chip bis dahin lediglich fünf Referenzpunkte (die Jahre 1959 bis 1965) gab – eine Projektion dieser jungen Entwicklung bis ins Jahr 1975 musste daher etwas voreilig erscheinen. Tatsächlich traf Moore's erste Vorhersage nicht ganz ein, weshalb er sie zehn Jahre später nach unten korrigierte. Doch der Grundgedanke – die exponentielle Zunahme der Preis-Leistung von Elektronik aufgrund immer kleinerer Transistoren in Mikrochips – war richtig und wegweisend.²

Heute ist nicht mehr die Rede von Tausenden Komponenten, sondern von Milliarden. In den neuesten Chips von 2004 sind logische Gatter nur noch fünfzig Nanometer breit, bewegen sich also längst im Bereich der Nanotechnik (welche sich mit Größen unter hundert Nanometern befasst). Regelmäßig wird das baldige Ende des Moore'schen Gesetzes verkündet, doch dieses außerordentliche Paradigma zieht sich immer weiter in die Länge. Paolo Gargini, Intels Leiter für technologische Strategie und Vorsitzender der einflussreichen International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) sagte kürzlich: „Es sieht ganz so aus, als könnten wir das Moore'sche Gesetz zumindest über die nächsten 15 bis 20 Jahre aufrechterhalten. Tatsächlich [...] bietet die Nanotechnik viele neue Schrauben, an denen wir drehen können, um die Anzahl von Komponenten auf einem Chip zu vergrößern.“³

Die Beschleunigung von Berechnung hat, wie wir in diesem Buch sehen werden, die Welt verändert – vom Wirtschaftswesen bis hin zu politischen Institutionen. Moore's Artikel verschweigt jedoch, dass die Strategie, die Strukturgrößen von Mikrochips zu schrumpfen, nicht das erste Paradigma ist, das für exponentielles Wachstum von Berechnung und Kommunikation sorgt. Es ist nämlich bereits das fünfte Paradigma, und das nächste ist bereits in Aussicht: Berechnung auf Molekularebene und in drei Dimensionen. Obwohl uns das fünfte Paradigma noch über ein Jahrzehnt lang genügen wird, machen wir bereits überzeugende Fortschritte im

Bereich all jener Techniken, die für das sechste Paradigma benötigt werden. Im Folgenden setze ich auseinander, wie viel Rechenleistung und Speicher nötig sind, um die Ebene menschlicher Intelligenz zu erreichen, und warum wir davon ausgehen können, dass innerhalb von zwei Jahrzehnten preisgünstige Computer mit ebensolchen Leistungen verfügbar werden – und auch diese Computer werden noch längst nicht das Ende vom Lied sein. Im letzten Teil dieses Kapitels beschreibe ich die Grenzen der Rechenleistung gemäß unserem derzeitigen Physikverständnis. Das bringt uns zu den Computern des späten einundzwanzigsten Jahrhunderts.

Der Übergang zum 3-D-Molekularcomputer. Die ersten Vorboten sind schon unterwegs: Zu den neuen Techniken, die das sechste Paradigma des molekularen, dreidimensionalen Rechnens ermöglichen, gehören Nanoröhren und Nanoröhrenchips, Molekularrechner, Selbstorganisation in Nanoröhrenchips, Emulation von Nanoschaltungen durch biologische Systeme, Berechnung mithilfe von DNS, von Elektronenspins (Spintronik) und Licht, sowie Quantencomputer. Viele dieser unabhängigen Techniken sind kombinierbar zu Systemen, deren Rechenleistung sich allmählich der theoretischen Kapazitätsgrenze von Materie und Energie annähert und die Rechenleistung des menschlichen Gehirns weit übersteigt.

Ein erster Ansatz besteht in der Konstruktion drei-dimensionaler Schaltungen mittels „konventioneller“ Silizium-Lithografie. Matrix Semiconductors verkauft bereits Speicherchips, die senkrecht gestapelte Transistorebenen enthalten, anstatt nur einer einzigen, flachen Schicht.⁴ Ein solcher 3-D-Chip hat eine höhere Kapazität, spart also Platz. Darum zielt Matrix zunächst auf tragbare Elektronik ab, und versucht mit Flashspeichern zu konkurrieren. (Flashspeicher kommen in Handys und Digicams zum Einsatz, da sie bei Stromunterbrechung keine Daten verlieren). Die gestapelte Chiptechnik verringert auch die Bit-Kosten. Ein anderer Vorstoß stammt vom Erfinder des besagten Flashspeichers, dem ehemaligen Toshiba-Ingenieur Fujio Masuoka. Dieser verkündete, einen neuartigen, zylinderförmigen Speicheraufbau entwickelt zu haben, der die Kosten pro Bit gegenüber flachen Chips um den Faktor zehn verringert.⁵ Das Center for Gigascale Integration des Rensselaer Polytechnic Institute

und das MIT Media Lab demonstrierten ebenfalls funktionierende Prototypen dreidimensionaler Siliziumchips.

Die Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT) in Tokio hat ein spektakuläres 3-D-Verfahren präsentiert, das mittels Elektronenstrahl-Lithografie beliebige dreidimensionale Gebilde mit Strukturgrößen von nur zehn Nanometern erzeugt.⁶ Als Demonstration erstellte NTT ein sechzig Mikrometer großes, detailliertes Modell der Erde. Laut NTT taugt das Verfahren sowohl für die Nanofertigung von elektrischen Geräten wie Halbleitern als auch von mechanischen Systemen im Nanomaßstab.

Nanoröhren bleiben Spitzenreiter. In *The Age of Spiritual Machines* räumte ich Nanoröhren (bestimmte, dreidimensional angeordnete Moleküle, die als Speicherbausteine oder Logikgatter dienen) die größten Chancen ein, Vorreiter der Ära dreidimensionaler Molekularcomputer zu werden. Die ersten Nanoröhren wurden bereits 1991 hergestellt. Eine Nanoröhre ist ein geschlossener Zylinder aus einem hexagonalen Netz von Kohlenstoffatomen.⁷ Einschichtige Nanoröhren haben einen Durchmesser von nur einem Nanometer, können also mit hoher Dichte nebeneinander platziert werden.

Außerdem sind sie potenziell sehr schnell. Peter Burke und seine Mitarbeiter von der University of California in Irvine präsentierten vor Kurzem Nanoröhrenschaltungen mit 2,5 Gigahertz (Ghz). Burke bemerkte jedoch in *Nano Letters* (Fachzeitschrift der American Chemical Society), die theoretische Maximalgeschwindigkeit für Nanoröhren „müsste bei einem Terahertz [1 THz = 1.000 Ghz] liegen, also etwa 1.000 Mal schneller als moderne Computer“.⁸ Ein Kubikzoll voll ausgereifter Nanoröhren-Schaltkreise wäre demnach bis zu einhundert Millionen Mal leistungsfähiger als das menschliche Gehirn.⁹

Als ich 1999 über Nanotechnik schrieb, war sie noch umstritten; sie hat jedoch in den letzten sechs Jahren drastische Fortschritte gemacht. Zwei wichtige Schritte gelangen im Jahr 2001: In der Zeitschrift *Science* vom 6. Juli 2001 war von einem Nanoröhren-Transistor (mit einem Durchmesser von zwanzig Nanometern) zu lesen, der bei Raumtemperatur funktioniert und durch ein einziges Elektron an- und ausgeschaltet wird.¹⁰ Etwa

zeitgleich präsentierte IBM eine Platine mit eintausend Nanoröhren-Transistoren.¹¹

In der darauffolgenden Zeit entstanden erste funktionstüchtige Chip-Modelle mit Nanoröhren. Im Januar 2004 bauten Forscher der University of California in Berkeley sowie der Stanford University einen auf Nanoröhren basierenden Speicherchip.¹² Eines der Probleme, die sich dabei stellen, ist, dass nur manche Nanoröhren halbleitend (also schaltbar und somit tauglich für logische Gatter) sind, während andere Nanoröhren den Strom einfach nur weiterleiten. Den Unterschied machen feinste Struktureigenschaften; bis vor Kurzem musste jede Nanoröhre von Hand überprüft werden, was für größere Schaltungen nicht infrage kommt. Den Forschern in Berkeley und Stanford gelang es, das Testen und Aussortieren zu automatisieren.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, die zunächst kreuz und quer wachsenden Röhren einheitlich auszurichten. IBM hatte 2001 die Massenproduktion von Nanoröhren-Transistoren demonstriert. Dabei setzten sie auf sogenannte „konstruktive Destruktion“, das heißt: Zerstören von unbrauchbaren Röhren direkt auf dem Wafer*, anstatt manueller Auslese. Thomas Theis (physikwissenschaftlicher Leiter des IBM Thomas J. Watson Research Center) sagte damals: „Wir glauben, dass IBM nun einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zu Molekularchips passiert hat. [...] Falls unsere Bestrebungen erfolgreich sind, dann werden wir mithilfe von Nanoröhren das Moore'sche Gesetz – zumindest, was die Dichte betrifft – auf unbestimmte Zeit aufrechterhalten können. Ich habe nämlich kaum Zweifel daran, dass man Nanoröhren kleiner bekommt, als alles, was an Silikontransistoren noch kommen mag.“¹³ Im Mai 2003 ging Nantero (ein kleines, von Harvard-Forscher Thomas Ruecker mitbegründetes Unternehmen) noch einen Schritt weiter und präsentierte einen einzelnen Wafer mit einer Milliarde korrekt ausgerichteten Nanoröhren-Verbindungen. Die Nantero-Technik greift auf gewöhnliche lithografische Verfahren zurück, um falsch ausgerichtete Nanoröhren automatisch zu entfernen. Der Einsatz von bestehendem Gerät ließ Industrievertreter aufhorchen, da somit die Kosten für neue Maschinen eingespart werden können. Die Nantero-Technik verspricht einen direkt adressierbaren,

nichtflüchtigen Speicher und somit einen potenziellen Nachfolger für alle Speicherarten (RAM-, Flash- und Plattenspeicher).

Rechnen durch Moleküle. Von Nanoröhren mal abgesehen gab es in den letzten Jahren auch große Fortschritte mit Berechnung durch ein einziges beziehungsweise einige wenige Moleküle. Die Idee, mit Molekülen zu rechnen, wurde erstmals in den frühen 1970ern durch Avi Aviram (IBM) und Mark A. Ratner (Northwestern University) aufgeworfen.¹⁴ Damals fehlten jedoch die technischen Voraussetzungen: Erst durch die neuesten Fortschritte auf dem Gebiet der Elektronik, Physik und Chemie, sowie des Reverse Engineering biologischer Prozesse, kann diese Idee nun allmählich konkrete Gestalten annehmen.

2002 bauten Wissenschaftler der Universitäten von Wisconsin und Basel ein „atomares Laufwerk“, das einem kleinen Festplattenspeicher aus einzelnen Atomen gleichkommt. Dabei wurden mithilfe eines Rastertunnelmikroskops einzelne Silizium-Atome an je einen Block von zwanzig weiteren Silizium-Atomen angefügt beziehungsweise wieder entfernt. Die theoretische Speicherkapazität dieser Methode ist nach Meinung der Forscher millionenfach höher als auf einer magnetischen Festplatte vergleichbarer Größe: etwa 250 Terabit pro Quadratzoll. Die Demonstration beschränkte sich allerdings auf wenige Bits.¹⁵

Peter Burke veranschlagte für Molekularschaltungen eine Taktfrequenz von einem Terahertz. Forscher der University of Illinois untermauerten diese Prognose, indem sie einen Transistor im Nanoformat mit immerhin 604 Gigahertz (mehr als ein halbes Terahertz) herstellten.¹⁶

Ein Hoffnungsträger für molekulare Berechnungen sind sogenannte „Rotaxane“: Moleküle mit einer Ringstruktur, die verschiedene energetische Zustände annehmen kann. Rotaxane wurden bereits experimentell als Schaltung und Datenspeicher eingesetzt und versprechen eine Speicherdichte von einhundert Gigabit pro Quadratzoll – und noch viel mehr bei dreidimensionaler Bauweise!

Selbstanordnung*. Eine weitere wichtige Voraussetzung für effiziente Nanoelektronik ist Selbstanordnung – das heißt: Anstatt die Anordnung von

mehreren Billionen Komponenten zentral zu steuern, organisieren sich diese autonom auf Nanoebene und sondern dabei defekte Komponenten automatisch aus. Computerschaltkreise könnten dadurch in großem Stil im Reagenzglas zusammengemixt werden; Milliarden teure Fabriken wären nicht mehr nötig. Chemie ersetzt Lithografie – so sehen es zumindest Wissenschaftler der UCLA.¹⁷ Die Purdue University präsentierte bereits Nanoröhren-Stukturen, die sich, ähnlich wie DNS-Doppelstränge, selbst organisieren.¹⁸

An der Harvard University gelang 2004 ein wichtiger Schritt mit einem Verfahren, das auf massenhafter Selbstorganisation basiert: Zunächst werden fotolithografisch die gewünschten Verbindungen in eine Platte geätzt. Diese Schablone wird dann mit Feldeffekttransistoren (eine gebräuchliche Art von Transistor) und Nanodrähten überschüttet, welche sich von allein in der gewünschten Anordnung zusammenfinden.¹⁹

Die University of California und das Ames Research Center der NASA entwickelten 2004 eine Methode zur Erzeugung extrem dichter, selbstorganisierter Schaltkreise in chemischer Lösung.²⁰ Dabei werden Nanodrähte spontan erzeugt, auf denen sich dann automatisch Nano-Speicherzellen (mit je drei Bit) aufbauen. Die Speicherdichte beträgt dabei 258 Gigabit pro Quadratzoll (was sich angeblich noch verzehnfachen lässt). Zum Vergleich: Flash-Speicherkarten bringen es derzeit auf 6,5 Gigabit. IBM präsentierte 2003 ein funktionsfähiges Speichermedium aus Polymeren, die sich autonom in zwanzig Nanometer breiten, hexagonalen Strukturen organisieren.²¹

Wichtig ist auch, dass Nano-Schaltkreise sich dynamisch anpassen können. Bei einer großen Anzahl winzigster (und somit fehleranfälliger) Komponenten sind Ausfälle unvermeidlich. Es wäre unökonomisch, ein System mit einer Billion Komponenten komplett wegzuwerfen, weil ein paar Transistoren defekt sind. Um das zu vermeiden, werden zukünftige Schaltungen ständig ihre eigene Funktion überwachen und defekte Bereiche überbrücken – genau so, wie im Internet defekte Knoten automatisch umgangen werden. IBM war auf diesem Gebiet besonders aktiv und hat bereits Pläne für Mikroprozessoren in der Schublade, die automatisch

Fehlfunktionen diagnostizieren und sich dementsprechend rekonfigurieren.²²

Natur-Emulation. Selbstreplizierende und selbstorganisierende elektronische und mechanische Systeme haben oft Vorbilder in der Natur. Eine Veröffentlichung in *Proceedings of the National Academy of Science* beschreibt eine auf Prionen basierende Konstruktion von selbstreplizierenden Nanodrähten.²³ (Prionen sind selbstreplizierende Proteine; eine bestimmte Prionenart spielt vermutlich eine Rolle für das menschliche Gedächtnis, eine andere scheint die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit [das menschliche Äquivalent zu BSE] zu verursachen – siehe **Kapitel 4**). Die Forscher wählten Prionen aufgrund ihrer natürlichen Stabilität, benutzten aber – da Prionen für gewöhnlich nicht leiten – eine genetisch veränderte Variante mit einer dünnen Goldschicht, welche den elektrischen Widerstand herabsetzt. Die Leiterin der Studie Susan Lindquist (Biologieprofessorin am MIT): „Die meisten Leute, die mit Nanoschaltungen arbeiten, versuchen diese in ‚top-down‘*-Verfahren zu fabrizieren. Wir dachten, wir versuchen es mal mit einem ‚bottom-up‘-Ansatz und überlassen der molekularen Selbstanordnung den komplizierten Teil der Arbeit.“

Das ultimative selbstreplizierende Bio-Molekül ist natürlich die DNS. Forscher der Duke University generierten molekulare Bauelemente – sogenannte „tiles“** – aus selbstorganisierten DNS-Molekülen.²⁴ Sie steuerten deren Anordnung und erzeugten dadurch ein „Nanoraster“. An jede Zelle des Rasters wurden dabei Proteine angehängt, die Rechenoperationen ausführen könnten. Der leitende Wissenschaftler Hao Yan sagte (bezüglich der entsprechenden Veröffentlichung in der Zeitschrift *Science* vom 26. September 2003): „Seit Jahren wird versucht die DNS-Selbstanordnung auszunutzen, um Proteine oder andere Moleküle nach Schablonen anzuordnen. Dies ist die erste klare Demonstration.“²⁵

Rechnen durch DNS. Die DNS ist der nanogefertigte Computer der Natur. Ihre Fähigkeit, auf molekularer Ebene Informationen zu speichern und logische Operationen auszuführen, kam bereits in speziellen „DNS-

Computern“ zum Einsatz. Darunter zu verstehen ist im Grunde ein Reagenzglas mit Billionen in Wasser gelösten DNS-Molekülen – jedes davon ein kleiner Computer.

Das Ziel von Berechnung ist, ein Problem zu lösen und die Lösung als Sequenz von Symbolen auszugeben. (Bei dieser Sequenz kann es sich um einen mathematischen Beweis handeln, oder auch nur um eine einzige Zahl). Bei einem DNS-Computer funktioniert das folgendermaßen. Jedes mögliche Symbol wird durch einen kurzen DNS-Strang kodiert. Jeder dieser Stränge wird durch eine sogenannte „Polymerase-Kettenreaktion“ (PCR) billionenfach vervielfältigt, worauf alles zusammen in ein Reagenzglas kommt. Da sich DNS-Stränge gerne aneinanderknüpfen, entstehen automatisch lange Stränge, die jeweils eine Sequenz von Symbolen – und somit eine möglich Lösung – kodieren. Da wir es mit Billionen von Einzelsträngen zu tun haben, entstehen dabei mit Sicherheit mehrere Stränge für jede Symbolsequenz – also jede mögliche Lösung.

Im nächsten Schritt werden alle mögliche Lösungen *simultan* getestet: Spezielle Enzyme zerstören alle Stränge, die bestimmte Kriterien nicht erfüllen. Der Reihe nach werden verschiedene Enzyme beigesetzt, und mit der richtigen Auswahl von Enzymen werden dabei alle inkorrekten Lösungen eliminiert, bis nur noch die richtige Antwort übrig bleibt. (Siehe Fußnote für eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens).²⁶

Die Stärke dieses Verfahrens besteht darin, dass sämtliche der Billionen von DNS-Strängen simultan getestet werden. Im Jahr 2003 kombinierten israelische Wissenschaftler des Weizmann Institute of Science unter der Leitung von Ehud Shapiro DNS mit Adenosin-Triphosphat (ATP), dem natürlichen Treibstoff biologischer Systeme.²⁷ Dadurch war jedes DNS-Molekül in der Lage, Berechnungen auszuführen und sich dabei selbst mit Energie zu versorgen. Die Forscher präsentierten eine Konfiguration aus etwa zwei Löffeln dieser Computerflüssigkeit mit dreißig Millionen Milliarden Computer-Molekülen, die insgesamt 660 Billionen Operationen pro Sekunde leisteten ($6,6 \times 10^{14}$ cps). Der Energiebedarf war dabei extrem niedrig: etwa fünfzig millionstel Watt für alle dreißig Millionen Milliarden Komponenten.

DNS-Berechnung in diesem Sinne hat jedoch Grenzen: Die vielen Billionen Molekülrechner führen immer alle gleichzeitig dieselbe Operation (auf unterschiedlichen Daten) aus. Es handelt sich also um eine SIMD*-Architektur. Solche Systeme sind zwar auf einige wichtige Problemklassen anwendbar (kombinatorische Probleme oder beispielsweise die parallele Umrechnung vieler Pixel durch grafische Filter), sie sind jedoch nicht für jede Art von Algorithmus geeignet, taugen also nicht als Allzweckcomputer. (Das gilt allerdings nicht für die zuvor beschriebenen Verfahren der Purdue University und der Duke University, die dreidimensionale Strukturen mittels selbstorganisierender DNS-Stränge erzeugen: Mit solchen Methoden lassen sich potenziell beliebige Systeme aufbauen, die nicht auf SIMD beschränkt sind).

Spintronik. Elektronen besitzen neben ihrer negativen Ladung noch eine weitere Eigenschaft, die sich zum Berechnen und Speichern nutzen lässt: den Spin. Der Quantenmechanik zufolge rotieren Elektronen um ihre eigene Achse, wie die Erde. Im Fall der Elektronen ist das jedoch ein rein theoretisches Konzept: Wir betrachten Elektronen eigentlich als ausdehnungslose Punkte, somit ist es schwierig, sich vorzustellen, dass sie sich drehen. Doch wenn sich elektrische Ladungen bewegen, erzeugen sie ein ganz reales und messbares magnetisches Feld. Ein Elektron kann in zwei Richtungen rotieren („nach oben“ und „nach unten“) – und diese Eigenschaft können wir für logische Schaltungen oder zum Kodieren von Speicherbits verwenden.

Das Spannende an Spintronik ist, dass ein Umschalten des Spins von Elektronen keinerlei Energie erfordert. Professor Shoucheng Zhang (Stanford University) und Professor Naoto Nagaosa (Universität Tokio) dazu: „Wir haben das Pendant zum Ohmschen Gesetz [Stromstärke gleich Spannung durch Widerstand] entdeckt [...] [Es] besagt, dass der Spin eines Elektrons ohne Energieverlust oder Dissipation übertragbar ist. Des weiteren tritt dieser Effekt bei Raumtemperatur auf, und zwar in Materialien, die in der Halbleiterindustrie bereits weit verbreitet sind, beispielsweise Galliumarsenid. Dies ist eine wichtige Entdeckung, da sie potenziell eine neue Generation von Computern möglich macht.“²⁸

Demnach ist es also möglich, die Effizienz von Supraleitung (völlig verlustfreie Informationsübertragung mit annähernd Lichtgeschwindigkeit) bei Raumtemperatur zu erreichen. Außerdem können mehrere Eigenschaften eines Elektrons gleichzeitig genutzt werden, was natürlich die Speicher- und Berechnungsdichte erhöht.

Mit einer Form von Spintronik ist der Konsument bereits vertraut: Durch magnetoresistive Effekte (Änderung des elektrischen Widerstands durch ein Magnetfeld) werden Daten auf den heutigen Magnetfestplatten gespeichert. Eine vielversprechende neue Art von nichtflüchtigem Speicher ist MRAM (Magnetischer RAM), dieser soll in wenigen Jahren marktreif sein. Wie gewöhnliche Festplatten behält MRAM seine Daten auch ohne Stromzufuhr, braucht dazu jedoch keine beweglichen Teile mehr und ist ähnlich schnell und wiederbeschreibbar wie gewöhnlicher RAM.

MRAM hält die Daten in ferromagnetischen Metallegierungen, die zwar zur Speicherung geeignet sind, jedoch nicht für die logischen Operationen eines Prozessors. Der heilige Gral der Spintronik ist daher die Nutzbarmachung spintronischer Effekte in Halbleitern, denn eine solche Technik wäre dann gleichzeitig für Speicher und Logik einsetzbar – und siehe da: Im März 2004 vermeldete eine internationale Gruppe von Wissenschaftlern eine neuartige, mit Kobalt dotierte Silizium-Eisen-Legierung, die sowohl die für Spintronik erforderlichen magnetischen Eigenschaften als auch die Kristallstruktur von Silizium-Halbleitern aufweist.²⁹

Spintronik spielt in Zukunft mit Sicherheit eine wichtige Rolle für Computerspeicher und wahrscheinlich auch für logische Systeme. Als quantenmechanisches Phänomen findet Spintronik möglicherweise vor allem in Quantencomputern Anwendung, das heißt man benutzt den Spin von verschränkten Elektronen um „Qubits“ zu bilden – doch mehr dazu später.

Mithilfe des Spins wurden auch schon erfolgreich Informationen in Atomkernen gespeichert: Forscher der University of Oklahoma schrieben per „Molekularfotografie“ 1.024 Bits auf ein einziges Flüssigkristall-Molekül aus neunzehn Wasserstoffatomen.³⁰

Rechnen durch Licht. Ein weiteres SIMD-Verfahren beruht auf einem Bündel von Laserstrahlen, deren Photonensequenzen Informationen kodieren. Mittels optischer Komponenten können diese Sequenzen logischen und arithmetischen Operationen unterzogen werden: Ein kleines, israelisches Unternehmen namens Lenslet entwickelte ein System mit 256 Lasern, das acht Billionen Operationen pro Sekunde abwickelt, indem es je eine Operation auf allen 256 Strahlen gleichzeitig ausführt.³¹ Auf diese Weise können beispielsweise 256 Video-Streams gleichzeitig komprimiert werden.

SIMD-Techniken (wie DNS-Computer und optische Computer) werden in Zukunft wichtige Spezialaufgaben erfüllen. Sie sind hilfreich bei der Nachbildung bestimmter Gehirnfunktionen, etwa der Verarbeitung von Sinneseindrücken. Andere Gehirnregionen, die zum Beispiel für Lernen und rationales Denken zuständig sind, erfordern jedoch Allzweckcomputer mit MIMD*-Architektur. Für Hochleistungs-MIMD-Systeme brauchen wir das oben beschriebene Paradigma dreidimensionaler Molekularcomputer.

Quantencomputer. Quantencomputer ermöglichen potenziell noch viel extremere Formen von SIMD-Parallelverarbeitung. Sie sind jedoch noch nicht annähernd so weit entwickelt, wie die bisher genannten Techniken. Quantencomputer basieren auf Qubits, die dank der quantenmechanischen Unschärferelation gewissermaßen null und eins zugleich sind. Jedes Qubit ist durch eine quantenmechanische Eigenschaft eines Teilchens dargestellt, zum Beispiel durch den Spin eines Elektrons. Sind Qubits miteinander „verschränkt“, so befindet sich ein jedes gleichzeitig in beiden möglichen Zuständen. Ein als „Dekohärenz“ bezeichneter Vorgang überführt Qubits aus dem Überlagerungszustand in eine eindeutige Sequenz von Nullen und Einsen. Bei einem entsprechend aufgebauten Quantencomputer stellt diese Sequenz die gesuchte Lösung für ein gegebenes Problem dar, weil nur die gewünschten Bitzustände nach der Dekohärenz erhalten bleiben.

Wie bei DNS-Computern ist hier eine geeignete Formulierung des Problems beziehungsweise der Lösungskriterien entscheidend. Ein Quantencomputer probiert praktisch jede mögliche *Kombination* von Qubit-Werten auf einmal aus. Ein Quantencomputer mit Tausend Qubits könnte

somit $2^{1.000}$ (ungefähr eine Eins mit 301 Nullen) Lösungen simultan überprüfen.

Ein solches Gerät wäre weitaus leistungsfähiger als jeder DNS-Computer oder jeder andere erdenkliche Rechner. Es gibt jedoch zwei Einschränkungen. Zum einen sind Quantencomputer – genau wie DNS- und Licht-Computer – nur auf bestimmte Probleme anwendbar, nämlich auf solche, für die es eine einfache Möglichkeit gibt, Lösungen auf Korrektheit zu prüfen.

Ein klassisches Beispiel für solche Probleme ist Faktorzerlegung. Dabei gilt es kleine Zahlen zu finden, die multipliziert eine bestimmte große Zahl ergeben. Selbst mit massiver Parallelisierung können digitale Computer derzeit keine Zahlen mit mehr als 512 Bits faktorisieren.³² Viele Verschlüsselungsverfahren beruhen auf dieser Tatsache und wären mithilfe von Quantencomputern leicht zu knacken.

Die zweite Einschränkung ist, dass die Leistung eines Quantencomputers von der maximalen Anzahl verschränkbarer Qubits abhängt – zehn ist der aktuelle Stand der Technik. Ein Zehn-Bit-Quantencomputer bringt uns nicht weit, denn 2^{10} ist gerade mal 1.024. In konventionellen Computern lassen sich Bits und logische Gatter ohne Weiteres aneinanderreihen. Doch zwei 10-Qubit-Komponenten ergeben nicht automatisch 20 Qubits, da alle Qubits verschränkt sein müssen, was sich als äußerst schwierig erweist.

Die Frage ist also: Wie kompliziert ist es, die Anzahl von Qubits zu vergrößern? Die Leistung von Quantencomputern wächst zwar exponentiell mit jedem zusätzlichen Qubit, das bringt uns jedoch wenig, wenn mit jedem Qubit auch die Herstellung exponentiell schwieriger wird. (Die Rechenleistung wäre dann lediglich linear proportional zum Herstellungsaufwand). Bisher vorgeschlagene Methoden zur Erhöhung der Qubit-Zahl machen die Systeme meist empfindlich und anfällig für frühzeitige Dekohärenz.

Andere vielversprechende Vorschläge, um die Anzahl deutlich zu steigern, wurden bisher noch nicht praktisch bestätigt. Stephan Gulde und seine Kollegen von der Universität Innsbruck haben einen Quantencomputer auf Grundlage eines einzelnen Calcium-Atoms entwickelt, der möglicherweise Dutzende – vielleicht bis zu einhundert –

Qubits anhand verschiedener quantenmechanischer Eigenschaften des Atoms kodieren kann.³³

Welche Rolle Quantencomputer letztlich spielen, steht noch in den Sternen. Doch selbst wenn es gelingen sollte, Hunderte Qubits zu verschränken, bleiben Quantencomputern stets Spezialaufgaben vorbehalten – ihre Rechenleistung aber ist nicht zu übertreffen.

Als ich in *The Age of Intelligent Machines* Molekularcomputer als sechstes Paradigma der Rechnertechnik vorschlug, war das Thema noch umstritten. Die zahlreichen Fortschritte der letzten fünf Jahre führten jedoch zu einem Umdenken, und mittlerweile hat man sich mit der Idee weitgehend angefreundet. Alle wichtigen technischen Voraussetzungen für dreidimensionale Molekularcomputer liegen bereits als Prototypen vor: molekulare Transistoren, Atom-basierte Speicherzellen, Nanodrähte sowie Methoden zur Selbstanordnung und Selbstdiagnose von Billionen (oder auch Billionen mal Billionen) von Komponenten.

Die Elektronik verabschiedet sich in Zukunft von fotolithografischer Chipherstellung nach exakten Schaltplänen in großen, zentralisierten Fabriken. Nanoschaltungen werden eher in kleinen chemischen Behältern hergestellt – ein weiterer wichtiger Schritt für die Dezentralisierung unserer industriellen Infrastruktur, der das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs während diesem Jahrhundert und darüber hinaus aufrechterhalten wird.

Die Rechenkapazität des menschlichen Gehirns

Es mag vorschnell erscheinen, in wenigen Jahrzehnten mit voll intelligenten Maschinen zu rechnen, wo Computer nach einem halben Jahrhundert Entwicklung doch kaum die geistigen Fähigkeiten von Insekten besitzen. Aus diesem Grund spotten auch viele langjährige KI-Forscher über diese Prognose und halten einen Zeitraum von einigen Jahrhunderten für plausibler. Es gibt jedoch sehr gute Gründe dafür, dass die Dinge in den nächsten fünfzig Jahren um einiges schneller gehen werden, als in den letzten fünfzig. [...] Seit 1990 hat sich die zur Verfügung stehende Leistung für KI und Robotiksoftware jährlich verdoppelt, auf 30 MIPS im Jahr 1994, und auf 500 MIPS im Jahr 1998. Lange unfruchtbar geglaubte Saat beginnt nun plötzlich zu sprießen. Maschinen lesen Texte, verstehen Gesprochenes und übersetzen zwischen Sprachen. Roboter fahren quer durchs Land, krabbeln auf dem Mars herum und tuckern durch Büroflure. Ein Programm namens EQP zum Beweisen von Theoremen lief 1996 fünf Wochen auf einem 50 MIPS-Computer des Argonne National Laboratory und fand einen Beweis für eine von Herbert Robbins aufgestellte Vermutung der Boolschen Algebra, den Mathematiker sechzig

Jahre lang nicht hatten finden können. Und das ist erst der Frühling. Wartet mal auf den Sommer.

HANS MORAVEC, „WHEN WILL COMPUTER HARDWARE MATCH THE HUMAN BRAIN?“, 1997

Wie groß ist die Rechenleistung unseres Gehirns? Es gibt eine Reihe von Schätzungen anhand der Gehirnregionen, die bisher erfolgreich nachmodelliert wurden und deren Funktionalität sich adäquat zur menschlichen Leistungsfähigkeit reproduzieren lässt. Wenn wir die Rechenleistung einer einzelnen Region kennen, können wir diese anhand des Anteils, den diese Region im Gehirn ausmacht, auf das gesamte Gehirn hochrechnen. Solche Schätzungen basieren auf funktioneller Simulation, das heißt, man reproduziert lediglich die Gesamtfunktion einer Region, anstatt jede einzelne Nervenzelle und jede Neuronenbindung zu simulieren.

Wir wollen uns nicht auf eine einzelne Hochrechnung verlassen, doch die Schätzungen anhand verschiedener Gehirnregionen stimmen alle einigermaßen überein. Die folgenden Werte beschränken sich auf die Größenordnung, sind also auf die nächste Zehnerpotenz gerundet. Für ihre Korrektheit spricht auch, dass verschiedene Berechnungsansätze zu ähnlichen Ergebnissen kommen.

Ob diese Schätzungen stimmen, hat übrigens keinerlei Bedeutung für die Prognose, dass es in den nächsten Jahrzehnten zur technologischen Singularität kommt und damit zur Verbillionenfachung menschlicher Intelligenz durch nichtbiologische Erweiterungen. Selbst wenn unsere Schätzungen zu optimistisch sind und die für eine Simulation des Gehirns benötigte Rechenleistung um Faktor zehn – oder gar um Faktor tausend – höher liegt, so verzögert sich die Singularität dadurch um gerade mal acht Jahre.³⁴ Bei einem Faktor von einer Million wären es fünfzehn, bei einer Milliarde fünfundzwanzig Jahre.³⁵

Hans Moravec, der legendäre Robotiker der Carnegie Mellon University, hat die neuronalen Verarbeitungsprozesse in der Netzhaut untersucht.³⁶ Diese ist etwa zwei Zentimeter breit und einen halben Millimeter dick. Sie ist hauptsächlich für die Wahrnehmung des Bildes zuständig, doch etwa ein Fünftel der Netzhaut führt auch erste Verarbeitungsschritte aus und erkennt

dabei Hell-dunkel-Übergänge und Bewegungen in etwa einer Million kleiner Bildausschnitte.

Moravecs Untersuchung ergab, dass die Netzhaut pro Sekunde zehn Millionen Bewegungs- und Kantenerkennungen ausführt. Um diese Verarbeitungsschritte maschinell zu reproduzieren, reichen nach Moravecs Schätzung (aufgrund jahrzehntelanger Erfahrung mit maschinellen visuellen Systemen) einhundert Computerbefehle pro Erkennung. Ein Computer braucht also 1.000 MIPS um alle Verarbeitungen der Netzhaut auszuführen. Die beteiligten Neuronen in der Netzhaut wiegen etwa 0,02 Gramm, das menschliche Gehirn ist insgesamt etwa 75.000 Mal schwerer – hochgerechnet ergibt das also 10^{14} (100 Billionen) Operationen pro Sekunde für das gesamte Gehirn.³⁷

Eine andere Schätzung ergibt sich aus der Arbeit von Lloyd Watts und seinen Kollegen, die funktionelle Simulationen von Regionen des menschlichen auditorischen Systems entwickeln (siehe **Kapitel 4**).³⁸ Ihre Software beherrscht unter anderem eine Funktion namens „stream separation“, welche beispielsweise in Konferenzschaltungen eingesetzt wird, um Telepräsenz zu erzeugen. (Telepräsenz ist das Gefühl räumlicher Anwesenheit bei Ferngesprächen). Das erfordert laut Watts „eine exakte Messung der Verzögerung, mit der räumlich entfernte Mikrofone den Ton empfangen“. Auch Tonhöhen, räumliche Position sowie Besonderheiten der Aussprache und Landessprache müssen dabei berücksichtigt werden. „Eine der wichtigsten Informationen anhand derer Menschen Klangquellen lokalisieren, ist die Laufzeitdifferenz, also der Zeitunterschied, mit dem der Klang die beiden Ohren erreicht.“³⁹

Die Gruppe um Lloyd Watts hat per Reverse Engineering funktionsäquivalente Nachbildungen der entsprechenden Gehirnregionen entwickelt. Watts schätzt, dass 10^{11} cps nötig sind, um die menschliche Fähigkeit der Klanglokalisation zu reproduzieren. Der dafür zuständige Gehirnbereich (der auditorische Kortex) macht mindestens 0,1 Prozent aller Nervenzellen des Gehirns aus. Somit kommen wir wieder auf rund 10^{14} cps (10^{11} cps x 10^3).

Eine Simulation der University of Texas, welche die Funktionalität des Kleinhirns (10^4 Nervenzellen) nachstellt, benötigte etwa 10^8 cps – also

ungefähr 10^4 cps pro Zelle. Auf die etwa 10^{11} Neuronen im ganzen Gehirn hochgerechnet, ergibt das etwa 10^{15} cps.

Wir werden uns später noch ausführlich mit dem aktuellen Stand des Reverse Engineering des Gehirns beschäftigen.* Klar ist bereits, dass eine Nachbildung der Gehirnfunktionen deutlich weniger Rechenaufwand erfordert als eine exakte Simulation der nichtlinearen Arbeitsweise jedes einzelnen Neurons und seiner Komponenten (also der komplexen Abläufe innerhalb jeder Nervenzelle). Das gilt schließlich auch für die Simulation anderer Organe: Derzeit werden erste Implantate getestet, welche anstatt der Bauchspeicheldrüse die Insulinregulation übernehmen.⁴⁰ Die Geräte messen den Blutzuckerspiegel und halten ihn in einem gesunden Bereich, indem sie je nach Bedarf Insulin ausschütten. Sie gehen also ähnlich vor wie die Bauchspeicheldrüse, simulieren jedoch nicht *jede einzelne* Inselzelle des Organs.

Alle Schätzungen bewegen sich in ähnlichen Größenordnungen (10^{14} bis 10^{15} cps). Da sich das Reverse Engineering des Gehirns noch in einem frühen Stadium befindet, gehe ich im Folgenden vorsichtshalber von 10^{16} cps aus.

Funktionelle Simulation ist ausreichend um Mustererkennung, Intelligenz und emotionale Intelligenz des menschlichen Gehirns zu reproduzieren. Anders sieht es aus, wenn wir die Persönlichkeit eines Menschen „uploaden“ wollen (also Wissen, Fähigkeiten und Charakter einer Person maschinell erfassen – mehr dazu am Ende von **Kapitel 4**). Denn dafür ist möglicherweise eine Simulation neuronaler Prozesse auf Ebene einzelner Nervenzellen sowie derer Bestandteile nötig, die da wären: Soma (Zellkörper), Axon (ausgehende Verbindung), Dendriten (das verästelte Gestrüpp eingehender Verbindungen) und Synapsen (Bereiche zwischen Axonen und Dendriten). Hier werden also detaillierte Neuronenmodelle erforderlich. Der durchschnittliche „Fan-Out“ (Anzahl ausgehender Verknüpfungen) eines Neurons beträgt 10^3 . Bei schätzungsweise 10^{11} Neuronen macht das insgesamt 10^{14} Verknüpfungen, und bei einer Aktivierungsdauer von fünf Millisekunden kommen wir damit auf 10^{16} synaptische Transaktionen pro Sekunde.

Nach bisherigen Simulationsmodellen zu urteilen, brauchen wir etwa 10^3 Rechenoperationen pro Sekunde, um eine synaptische Übertragung samt aller Nichtlinearitäten (komplexe Abläufe) in den Dendriten und anderen Bereichen zu simulieren. Eine detaillierte Simulation des ganzen Gehirns auf dieser Ebene erfordert demnach etwa 10^{19} cps.⁴¹ Das können wir also als obere Schranke betrachten – während für funktionale Äquivalenz wahrscheinlich 10^{14} bis 10^{16} cps ausreichen.

Der derzeit bei IBM in Entwicklung befindliche und zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Buches vermutlich einsatzbereite Superrechner Blue Gene/L soll es planmäßig auf 360 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde bringen ($3,6 \times 10^{14}$ cps).⁴² Das ist mehr als die kleinste unserer Schätzungen. Mit um die einhundert Terabyte (etwa 10^{15} Bits) hat Blue Gene/L bereits mehr Arbeitsspeicher, als für eine funktionale Gehirnsimulation schätzungsweise erforderlich ist (siehe unten). Übereinstimmend mit meinen früheren Vorhersagen erreichen Superrechner bis Ende des Jahrzehnts schließlich auch die vorsichtiger geschätzten 10^{16} cps (siehe das Diagramm „Wachstum der Leistung von Supercomputern“ auf [Seite 69](#)).

Schneller zum PC mit menschengleicher Leistung. Heimcomputer erreichen derzeit 10^9 cps. Auf 10^{16} cps schaffen sie es laut Diagramm „Exponentielles Wachstum der Rechnertechnik“ ([Seite 69](#)) erst im Jahr 2025. Es gibt jedoch mehrere Wege, um schon davor erschwingliche PCs mit menschlicher Leistungsfähigkeit zu bauen. Durch ASICs* anstelle von Allzweckprozessoren kann das Preis-Leistungs-Verhältnis für bestimmte, sehr häufig wiederholte Berechnungen stark verbessert werden. Das geschieht heute schon beispielsweise in Form von extrem leistungsfähigen Grafikchips für PC-Spiele. ASICs können das Preis-Leistungs-Verhältnis von Computern vertausendfachen – und somit besagten Termin (2025) um etwa acht Jahre nach vorn verschieben. Die Programme, auf denen eine Gehirnsimulation beruht, werden ebenfalls eine ordentliche Portion repetitiver Berechnungen enthalten und somit von ASIC-Implementierungen profitieren können. Das Kleinhirn beispielsweise enthält Milliarden Wiederholungen eines einzigen Verknüpfungsmusters.

Wir können die Möglichkeiten von PCs zudem erweitern, indem wir sie auf ungenutzte Rechenkapazitäten anderer Geräte im Internet zugreifen lassen. Neue Kommunikationskonzepte sehen vor, dass jedes Gerät in einem Netzwerk als Knoten fungiert, anstatt nur als Endpunkt (man spricht von „vermaschten Netzen“^{**}): Anstatt nur Informationen mit jeweils einem Knoten auszutauschen, wird jeder PC und jeder PDA selbst zum Knoten und tauscht sich mit allen in Reichweite befindlichen Geräten aus. Das Ergebnis ist ein äußerst stabiles, selbstorganisiertes Kommunikationsnetz, das es einfach macht, unausgelastete Prozessoren anderer Geräte anzuzapfen.⁴³

Mindestens 99 Prozent – wenn nicht 99,9 Prozent – der Rechenkapazität aller Computer im Internet liegen derzeit brach. Eine effektive Nutzbarmachung dieser Kapazitäten könnte eine weitere Preis-Leistungs-Steigerung um Faktor 10^2 oder 10^3 bedeuten. Daher ist anzunehmen, dass man um 2020 für tausend Dollar einen Computer bekommt, der über die Kapazität eines menschlichen Gehirns verfügt – zumindest was die reine Rechenleistung betrifft.

Und es gibt noch eine Möglichkeit, um die Verfügbarkeit solcher Geräte zu beschleunigen: So wie viele Prozesse im menschlichen Gehirn sind Transistoren ihrer Natur nach „analog“. Analoge Prozesse lassen sich mit beliebiger Genauigkeit digital emulieren, jedoch sinkt dadurch die Effizienz um mehrere Größenordnungen. Im Prinzip reicht ein einziger Transistor, um zwei analog repräsentierte Zahlen zu multiplizieren, während dafür in einer digitalen Schaltung Tausende von Transistoren nötig sind. Carver Mead vom California Institute of Technology hat auf diesem Gebiet Pionierarbeit geleistet.⁴⁴ Ein Nachteil dieses Ansatzes ist die hohe Entwicklungszeit, weshalb die meisten Forscher bei der Entwicklung von Gehirnsimulation auf gewöhnliche Softwarekonzepte zurückgreifen.

Menschliche Speicherkapazität. Wie sieht es mit der Speicherkapazität des menschlichen Gehirns aus? Der Zeitplan ist auch in diesem Fall dem der Rechenleistung vergleichbar. Ein menschlicher Experte auf einem bestimmten Gebiet verfügt in der Regel über etwa 10^5

„Wissenseinheiten“, damit gemeint sind sowohl gespeicherte Muster (zum Beispiel Gesichter) als auch spezifisches Wissen. So sind die weltbesten Schachgroßmeister mit schätzungsweise 100.000 Stellungen vertraut. Shakespeare benutzte 29.000 Wörter – in fast 100.000 verschiedenen Bedeutungen. Auch die Entwicklung von medizinischen Expertensystemen liefert Hinweise, dass Menschen ungefähr 100.000 Konzepte in einem bestimmten Fachbereich erfassen können. Angenommen, solches Fachwissen macht lediglich 1 Prozent des Wissens und der Erinnerungen eines Menschen aus, so beträgt die Gesamtkapazität 10^7 Wissenseinheiten.

Nach meinen eigenen Erfahrungen fallen bei der Speicherung vergleichbarer Einheiten – in regelbasierten Expertensystemen oder in selbstorganisierten Musterkennungssystemen – ungefähr 10^6 Bits pro Einheit an. Das ergäbe also eine Gesamtkapazität von 10^{13} (10 Billionen) Bits für das menschliche funktionale Gedächtnis.

Nach der ITRS Roadmap (siehe das Diagramm „DRAM-Größe“ auf [Seite 57](#)) sind 10^{13} Bit Computerspeicher gegen 2018 für tausend Dollar erhältlich. Nicht vergessen: Computerspeicher sind millionenfach schneller als die elektrochemische Speicherung im menschlichen Gehirn – und somit sehr viel effektiver.

Auch hier kommen wir natürlich auf einen deutlich höheren Wert, wenn wir eine exakte Simulation jeder einzelnen neuronalen Verbindung annehmen. Wir können davon ausgehen, dass 10^4 Bits pro Verbindung ausreichen, um alle Verknüpfungsmuster und Neurotransmitterkonzentrationen zu speichern. Bei 10^{14} Verbindungen macht das 10^{18} (eine Milliarde Milliarden) Bits.

Diesen Analysen zufolge ist davon auszugehen, dass die für eine Gehirn-Emulation nötige Hardware um 2020 für tausend Dollar erhältlich ist. Wie wir in [Kapitel 4](#) sehen werden, dauert es dann noch mal ungefähr zehn Jahre, bis auch die Software soweit ist. Natürlich wachsen auch in diesem Zeitraum Preis-Leistung, Kapazität und Leistung der Hardware exponentiell weiter – darum entspricht die Hardware für tausend Dollar im Jahr 2030 bereits einem ganzen Dorf von Menschenhirnen. Im Jahr 2050 leistet

Hardware für tausend Dollar mehr als die – rein biologischen – Gehirne der gesamten Weltbevölkerung.

Menschliche Nervenzellen sind Wunderwerke der Evolution – dennoch wollen (und werden) wir nicht Mikrochips mit den gleichen langsamen Mechanismen bauen. Neuronen stehen unseren technischen Schöpfungen qualitativ um mehrere Größenordnungen nach. Mithilfe des Reverse Engineerings unserer Körper und Gehirne können wir vergleichbare Systeme erschaffen, die viel langlebiger sind und Tausende Millionen Male schneller arbeiten als die elektrochemischen Mechanismen einer Nervenzelle – und die Technik schreitet immer schneller voran.

Der größte Teil der Komplexität eines Neurons dient seiner Selbsterhaltung und nicht der Informationsverarbeitung. Eines Tages werden wir in der Lage sein unsere Geistestätigkeit auf ein angemesseneres Medium zu transferieren. Dann sind unserem Geist keine Grenzen mehr gesetzt.

Grenzen der Berechnung

Wie viel Energie geht nach den Regeln der Physik mindestens als Wärme verloren, wenn ein Supercomputer maximaler Effizienz den ganzen Tag an einer Wettersimulation rechnet? Die Antwort ist schnell gefunden, da sie nicht vom Umfang der Berechnungen abhängt. Sie lautet null.

EDWARD FREDKIN, PHYSIKER⁴⁵

Fünf Paradigmen (elektrochemisches Rechnen, Relais, Elektronenröhren, diskrete Transistoren und Mikrochips) haben bisher Umfang und Preis-Leistung von Berechnung exponentiell wachsen lassen. Jedes Mal, wenn ein Paradigma an seine Grenzen stieß, trat ein anderes an seine Stelle. Das sechste Paradigma zeichnet sich bereits ab: Berechnung auf molekularer Ebene in drei Dimensionen. Berechnung bildet die Grundlage für alles, was uns im Leben wichtig ist, vom Wirtschaftswachstum bis zur menschlichen Intelligenz und Kreativität – daher sollten wir uns fragen: Gibt es eine absolute Obergrenze der Rechenkapazität von Energie und Materie? Wenn ja, wo liegt sie und wann werden wir sie erreichen?

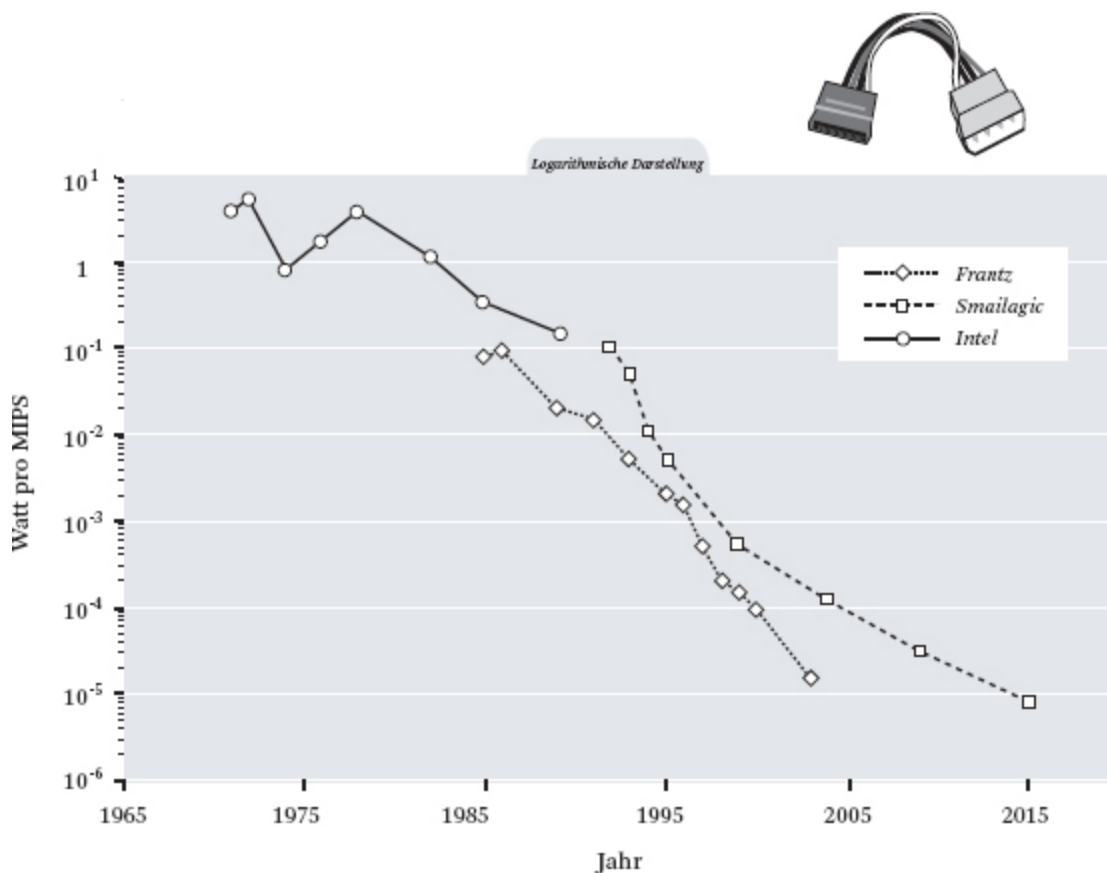
Unsere Intelligenz basiert auf Berechnungsprozessen, die wir gerade zu verstehen beginnen. Letztendlich werden wir unsere geistigen Fähigkeiten vervielfachen, indem wir sie durch ungleich leistungsfähigere nichtbiologische Hardware erweitern. Die Frage nach den Grenzen der Berechnung ist daher zugleich die Frage nach den Grenzen unserer Zivilisation.

Ein häufiger Einwand gegen die in diesem Buch beschriebenen Ideen lautet, dass die exponentiellen Entwicklungen irgendwann an eine Grenze stoßen müssen (wie es nun mal die Art solcher Entwicklungen ist). Wenn eine Spezies einen neuen Lebensraum erobert, vermehrt sie sich zunächst exponentiell – prominentes Beispiel: Kaninchen in Australien. Doch nach einiger Zeit sind die Ressourcen ausgelastet und das Wachstum ebbt ab. Auch die Ressourcen für Informationsverarbeitung sind natürlich endlich, das diktieren die Gesetze der Physik. Doch das Wachstum geht noch eine

ganze Weile weiter – bis nichtbiologische Intelligenz Billionen von Billionen von Billionen Mal mächtiger ist als unsere heutige Zivilisation.

Eine wichtige Rolle für die Grenzen der Berechnung spielt der Energieverbrauch. Wie wir im folgenden Diagramm sehen, hat der Energiebedarf pro MIPS exponentiell abgenommen.⁴⁶

Reduktion des Energiebedarfs pro MIPS



Wie wir wissen, hat andererseits die Leistung in MIPS exponentiell zugenommen. Inwiefern die Verringerung des Energieverbrauchs mit der Zunahme der Prozessorleistung Schritt halten kann, hängt vom Grad der Parallelisierung ab. Eine große Anzahl schwächerer Prozessoren erzeugt weniger Wärme (Energieverlust), da die Berechnungsabläufe räumlich besser verteilt sind. Prozessorleistung ist proportional zur Spannung und das Quadrat der Spannung ist proportional zum Energiebedarf. Ein

niedrigerer Prozessortakt verringert daher deutlich den Verbrauch. Wenn wir die Entwicklung vermehrt auf Parallelverarbeitung konzentrieren – und weniger auf schnellere Einzelprozessoren – so kann die Zunahme von MIPS pro Dollar durch verbesserte Energieeffizienz ausgeglichen werden (siehe die Abbildung auf der vorhergehenden Seite).

Die natürliche Evolution unseres Gehirns hat den gleichen Weg eingeschlagen: Unser Gehirn benutzt etwa einhundert Billionen Recheneinheiten (größtenteils Neuronenbindungen). Die einzelne Einheit aber verfügt über wenig Rechenleistung und produziert somit kaum Wärme.

Bis vor Kurzem bemühte sich Intel hauptsächlich um immer schnellere Einzelchip-Prozessoren, die jedoch immer heißer wurden. Nun setzt Intel zunehmend auf Parallelisierung durch mehrere Prozessoren auf einem Chip. Die Prozessortechnik wird sich immer weiter in diese Richtung bewegen, um Energiebedarf und Wärmeentwicklung zu begegnen.⁴⁷

Reversible Berechnung*. Massive Parallelverarbeitung allein wird nicht ausreichen, um Verbrauch und Wärme einzudämmen. Die derzeitige Computertechnik beruht auf sogenannter „irreversibler Berechnung“ – das heißt, die Software kann nicht rückwärts ablaufen. Nach jedem Programmschritt werden dessen Ausgangsdaten verworfen – teils gelöscht – und das Ergebnis wird an den nächsten Schritt übergeben. In der Regel werden keine Zwischenergebnisse festgehalten, da diese unnötig Speicher belegen würden. Vor allem Mustererkennungssysteme löschen gezielt einen Teil der Eingabedaten. Visuelle Systeme etwa, ob in Mensch oder Maschine, empfangen große Mengen von Eingabedaten (von den Augen oder optischen Sensoren), produzieren jedoch eine recht kompakte Ausgabe (Identifikation von Mustern). Nun ist es so, dass das Löschen von Daten Wärme erzeugt und Energie kostet: Jedes Mal, wenn ein Bit verloren geht, muss diese Information irgendwohin. Nach den Gesetzen der Thermodynamik wird das gelöschte Bit an die Umgebung abgegeben und erhöht dort die Entropie (welche ein Maß für Information darstellt). Somit steigt die Umgebungstemperatur (denn Temperatur ist ein Maß für Entropie).

Wenn wir jedoch die Bits der Ausgangsdaten eines Programmschritts nicht löschen, sondern innerhalb des Computers an einen anderen Ort

verschieben, so werden sie nicht an die Umgebung abgegeben, erzeugen keine Hitze und ihre Energie bleibt erhalten.

Rolf Landauer zeigte 1961, dass reversible logische Operationen (zum Beispiel NOT: die Negation eines Bits) ohne Wärmeabgabe oder Energiezufuhr ausgeführt werden können, während irreversible Operationen (zum Beispiel AND: Setze Bit C genau dann auf 1, wenn Bits A und B beide 1 sind) Energie erfordern.⁴⁸ Charles Benett zeigte 1973, dass jede Berechnung ausschließlich mit reversiblen logischen Operationen durchführbar ist.⁴⁹ Ed Fredkin und Tommaso Toffoli präsentierten zehn Jahre später eine umfassende Auseinandersetzung des Konzepts der reversiblen Berechnung.⁵⁰ Behält man alle Zwischenergebnisse – so die Idee – so kann man den Algorithmus am Ende zurückspulen und landet wieder beim Ausgangszustand, ohne Energie verbraucht oder Wärme erzeugt zu haben – und hat trotzdem das Ergebnis berechnet.

Wie schlau ist ein Fels? Um sich klarzumachen, dass sich ohne Energie und Hitze rechnen lässt, betrachten wir einmal mehr – einen Stein. Obwohl in einem solchen auf den ersten Blick nicht viel los zu sein scheint, sind die etwa 10^{25} (zehn Billionen Billionen) Atome in einem Kilogramm Fels äußerst rege. Auch in festen Objekten sind die Atome in ständiger Bewegung, tauschen Elektronen aus, ändern den Spin ihrer Partikel und erzeugen schnell wechselnde elektromagnetische Felder. All diese Aktivitäten stellen Berechnungen dar, wenn auch nicht sonderlich sinnvolle.

Wie wir gesehen haben, können Atome Informationen speichern, und zwar mit einer Dichte von über einem Bit pro Atom – zum Beispiel in Kernspinresonanzapparaten. Forschern an der University of Oklahoma gelang es, magnetische Interaktionen zwischen den Protonen eines einzigen Moleküls aus neunzehn Wasserstoffatomen zu benutzen, um 1.024 Bits zu speichern.⁵¹ Demnach enthält unser 1kg-Stein zu jedem Zeitpunkt mindestens 10^{27} Bits.

Was nun Berechnungen betrifft: Elektromagnetische Zustände in einem 1kg schweren Stein ändern sich mindestens 10^{15} Mal pro

Bit pro Sekunde – das ergibt effektiv etwa 10^{42} (eine Million Billionen Billionen Billionen) Rechenoperationen pro Sekunde. Dabei erzeugt der

Stein weder Wärme, noch nimmt er Energie auf.

Natürlich verrichtet der Stein trotz aller Aktivität auf Teilchenebene wenig sinnvolle Arbeit, es sei denn als Briefbeschwerer. Das liegt daran, dass die Atomstruktur größtenteils zufällig ist. Wären jedoch die Teilchen in einer zweckdienlichen Weise angeordnet, so hätten wir einen kalten, stromlos funktionierenden Computer mit gigantischem Speicher und 10^{42} Operationen pro Sekunde – etwa zehn Billionen Mal schneller als alle Menschenhirne der Erde zusammen, selbst wenn diese über (vorsichtig geschätzte) 10^{19} cps verfügen.⁵²

Ed Fredkins zeigte auch, dass es nicht einmal nötig ist, den Algorithmus am Ende wieder rückwärts zu durchlaufen.⁵³ Er präsentierte mehrere Ideen für reversible Logikgatter, welche die Umkehrungen schon während des Programmablaufs vornehmen und dabei universell sind, also ausreichend für allgemeine Computer.⁵⁴ Fredkin zeigte außerdem, dass ein so aufgebauter Computer nahezu die Effizienz eines Computers mit irreversiblen Gattern erreichen kann. Er schreibt:

[...] es ist möglich, [...] konventionelle Computermodule zu bauen, mit dem Unterschied, dass alle mikroskopischen Grundkomponenten reversibel sind. Dadurch sind auch die makroskopischen Operationen des Computers reversibel. Daraus ergibt sich die Antwort auf die Frage, wie ein maximal effizienter Computer auszusehen hat: Ein Computer kann vollkommen effizient arbeiten, wenn er aus mikroskopisch reversiblen Komponenten aufgebaut ist. Und wie viel Energie verliert ein vollkommen effizienter Computer in Form von Wärme? Die Antwort lautet: Ein solcher Computer produziert überhaupt keine Wärme.⁵⁵

Dass sich Wärmeentwicklung und Energieverbrauch durch reversible Logik reduzieren lassen, wurde experimentell bestätigt.⁵⁶

Der Kritikpunkt, reversible Rechnertechnik mache neue Programmiermethoden erforderlich, wird durch Fredkins reversible Logikgatter entkräftet: Er legt dar, dass wir herkömmliche Logik- und Speichersysteme vollständig aus reversiblen Logikgattern aufbauen und somit auch bewährte Methoden der Softwareentwicklung uneingeschränkt weiterbenutzen können.

Dies ist eine bedeutsame Erkenntnis: Berechnungsprozesse – das Fundament zukünftiger Technik und (in der Singularität) letztlich aller wichtiger Vorgänge auf der Welt – benötigen scheinbar keinerlei Energie!

Die Praxis ist etwas komplizierter. Um tatsächlich das Ergebnis einer Berechnung zu erfassen, müssen wir es kopieren und es irgendwie ausgeben. Dies ist ein irreversibler Prozess, bei dem mit jedem übertragenen Bit Wärme entsteht. In den meisten Fällen ist jedoch der Ausgabeprozess im Vergleich zum Rechenaufwand verschwindend gering, fällt also bei der Energiegleichung kaum ins Gewicht.

Logische Operationen weisen jedoch aufgrund von Wärmewirkung und quantenmechanischen Effekten unweigerlich eine gewisse Fehlerquote auf. Dem kann durch Fehlererkennungs- und Korrekturmechanismen abgeholfen werden, doch die Korrektur eines Bits ist ebenfalls irreversibel: Energie wird aufgenommen, Wärme abgegeben. Die Fehlerquoten sind im Allgemeinen sehr niedrig. Angenommen nur eines von 10^{10} Bits ist falsch, so haben wir den Energiebedarf um Faktor 10^{10} verringert – wenn auch nicht völlig eliminiert.

Für die Grenzen der Berechnung spielen Fehlerquoten also eine wichtige Rolle. Manche Methoden zur Beschleunigung von Berechnungen – zum Beispiel ein Erhöhen der Teilchenschwingungen – vergrößern zugleich die Fehlerquote. Hier finden sich also natürliche Schranken für das Berechnungspotenzial von Energie und Materie.

Eine weitere wichtige Entwicklung ist der bevorstehende Übergang von konventionellen Batterien zu kleinen Brennstoffzellen. (Chemische Energiespeicher, die beispielsweise Wasserstoff mit Sauerstoff aus Luft reagieren lassen). Erste Brennstoffzellen-Mikrosysteme sind bereits in Arbeit.⁵⁷ Im Zuge dreidimensionaler Molekularcomputer werden Energiequellen in Form von Nano-Brennstoffzellen dezentral zwischen den zahlreichen Parallelprozessoren verteilt sein. Die Zukunft der Nano-Energietechnik diskutieren wir in **Kapitel 5**.

Grenzen der Nano-Rechnertechnik. Trotz der erwähnten Einschränkungen liegen die absoluten Grenzen für Berechnung enorm hoch. Basierend auf Arbeiten von Professor Hans Bremermann (Berkeley University of California) und des Nanotechnik-Theoretikers Robert Freitas hat Professor Seth Lloyd (MIT) die maximale Rechenkapazität geschätzt, die ein ein Kilogramm schwerer Computer mit einem Liter Volumen nach

dem derzeitigen Stand der Physik erreichen kann. Das sind in etwa Gewicht und Größe eines kleinen Notebooks – Lloyd spricht vom „ultimativen Laptop“. ⁵⁸

Die Rechenkapazität steigt mit der verfügbaren Energie. Diesen Zusammenhang kann man sich folgendermaßen vorstellen: Die Energie einer bestimmten Menge von Materie ist die Summe der Energie ihrer Atome (und subatomarer Teilchen). Je mehr Atome, desto mehr Energie. Wie wir gesehen haben, kann potenziell jedes Atom für Berechnung genutzt werden, d.h.: Je mehr Atome, desto mehr Berechnung. Die Energie eines Atoms (oder sonstiger Teilchen) steigt mit dessen Schwingungsfrequenz: je mehr Schwingungen, desto mehr Energie. Dasselbe gilt für Rechenoperationen: je mehr Schwingungen, desto mehr Berechnungen kann ein einzelnes Teilchen ausführen. (Ganz wie bei unseren heutigen Prozessoren: je höher die Frequenz, desto größer die Rechengeschwindigkeit).

Die Energie eines Objekts ist also direkt proportional zu seiner Fähigkeit Berechnungen durchzuführen. Wie uns Einstein lehrt, ist die potenzielle Energie in einem Kilogramm Materie sehr groß: $E = mc^2$. Die Lichtgeschwindigkeit im Quadrat ist ein riesiger Wert: ungefähr $10^{17} \text{ m}^2/\text{s}^2$. Die Rechenkapazität von Materie hängt zudem noch von einem extrem kleinen Wert ab: Das Plancksche Wirkungsquantum – $6,6 \times 10^{-34}$ Joulesekunden (Joule ist ein Maß für Energie) – ist die kleinste Energiemenge, die wir für einen Berechnungsvorgang verwenden können. Die theoretische Obergrenze der Rechenkapazität eines Objekts erhalten wir also, indem wir seine Gesamtenergie (durchschnittliche Energie pro Teilchen mal Anzahl der Teilchen) durch das Plancksche Wirkungsquantum teilen.

Lloyd zeigt, dass das maximale Rechenpotenzial von einem Kilogramm Materie gleich π mal Energie durch die Planck-Konstante ist. Da die Energie so groß und die Planck-Konstante so klein ist, ist das Ergebnis astronomisch: etwa 5×10^{50} Operationen pro Sekunde. ⁵⁹

Bei Annahme unserer höchsten Schätzung menschlicher Gehirnkapazität (10^{10} Menschen mit je 10^{19} cps) entspricht das etwa fünf Milliarden Billionen Erdbevölkerungen. ⁶⁰ Schätzen wir die Hirnkapazität aufgrund

funktionaler Simulation auf 10^{16} cps, so leistet der ultimative Laptop soviel wie fünf Billionen Billionen Erdbevölkerungen.⁶¹ Ein solcher Computer könnte sämtliche Denkleistungen aller Menschen der letzten zehntausend Jahre innerhalb einer zehntausendstel Nanosekunde vollziehen.⁶²

Natürlich gibt es auch hier einige Vorbehalte. Die komplette Masse unseres Laptops in Energie zu verwandeln, würde eine thermonukleare Explosion bedeuten, wodurch die Ein-Liter-Grenze überschritten würde – abgesehen von anderen Unannehmlichkeiten. Wir bräuchten also, gelinde gesagt, ein sehr robustes Gehäuse.

Unter Betrachtung der maximalen Entropie (Freiheitsgrade aller Partikel) errechnet Lloyd außerdem eine theoretische Speicherkapazität von 10^{31} Bits für unser Gerät – eine technische Umsetzung dieser Speicherdichte ist allerdings schwer vorstellbar. Denkbar sind aber Techniken, die sich bis auf wenige Größenordnungen an das theoretische Maximum annähern. An der University of Oklahoma gelang es schließlich bereits, über fünfzig Bits pro Atom zu speichern (wenn auch vorerst nur mit einer kleinen Anzahl von Atomen). Es sollte also zumindest möglich sein, 10^{27} Bits in den 10^{25} Teilchen eines Kilogramms Materie unterzubringen.

Wir können verschiedene Eigenschaften eines Atoms (Position, Spin, quantenmechanischer Zustand seiner Komponenten) ausnutzen, um Informationen zu speichern – darum sollten wir es sogar auf etwas mehr als 10^{27} Bits bringen. Der Neurowissenschaftler Anders Sandberg schätzt die theoretische Speicherkapazität eines Wasserstoffatoms auf etwa vier Millionen Bits – dafür gibt es jedoch bisher keine praktischen Beweise, daher bleiben wir bei der konservativen Schätzung.⁶³ Wie zuvor besprochen sollten 10^{42} Rechenoperationen pro Sekunde ohne nennenswerte Wärmeentwicklung möglich sein. Durch reversible Rechentechnik und Minimierung von Fehlerquoten sollten wir es daher bei vertretbarem Energieumsatz auf 10^{42} bis 10^{50} Operationen pro Sekunde bringen.

Der Spielraum zwischen diesen beiden Grenzen ist ein kompliziertes Thema. Die technischen Schwierigkeiten, die sich auf dem Weg von 10^{42} zu 10^{50} ergeben, würden den Rahmen dieses Kapitels sprengen. Hier sei darum nur bemerkt, dass die Entwicklung nicht auf die Obergrenze 10^{50} abzielt und dann aus praktischen Gründen Abstriche macht, sondern sich von unten

her annähert und jede neue Entwicklungsebene genutzt wird, um die nächste zu erreichen. Sobald unsere Zivilisation 10^{42} cps (pro Kilogramm) erreicht, werden Wissenschaftler und Ingenieure diese ihre neu gewonnene (größtenteils nichtbiologische) Intelligenz einsetzen, um 10^{43} zu erreichen; und dann 10^{44} , und so weiter. Meine Vermutung ist, dass wir auf diese Weise ziemlich nah an das absolute Maximum herankommen.

Selbst mit 10^{42} cps bräuchte der ein Kilogramm schwere „ultimative Laptop“ nur zehn Mikrosekunden, um alle menschliche Denkleistung der letzten zehntausend Jahre (bei einer angenommenen Weltbevölkerung von dauerhaft zehn Milliarden) zu simulieren.⁶⁴ Ein Blick auf die Abbildung „Exponentielles Wachstum der Rechnertechnik“ (Seite 69) zeigt uns, dass Hardware mit dieser Leistung gegen 2080 für eintausend Dollar erhältlich ist.

Ein konservativeres, aber überzeugendes Konzept für massiv parallele, reversible Berechnung ist Eric Drexlers patentierter, komplett mechanischer Nanocomputer, bestehend aus winzigen Kohlenstoffstäbchen.⁶⁵ Berechnungen geschehen durch Verschiebung der Stäbchen, die anschließend durch eine Federung automatisch in ihre ursprüngliche Position zurückgebracht werden – wodurch der Prozess reversibel ist. Das Gerät hat eine Billion (10^{12}) Prozessoren mit insgesamt 10^{21} cps, genug um hunderttausend Gehirne in einem Kubikzentimeter zu simulieren.

Ein Termin für die Singularität. Lange vorher werden wir eine niedrigere, aber ebenso wichtige Schwelle überschreiten: Anfang der 2030er Jahre wird man für eintausend Dollar Hardware mit rund 10^{17} cps (vermutlich etwa 10^{20} cps mithilfe von ASICs und verteilter Berechnung im Internet) kaufen können. Heute geben wir jährlich über $\$10^{11}$ (\$100 Milliarden) für Rechnertechnik aus, im Jahr 2030 werden es – vorsichtig geschätzt – $\$10^{12}$ (\$1 Billion) sein. Das heißt, um 2030 produzieren wir jährlich (nichtbiologische) Hardware mit insgesamt 10^{26} bis 10^{29} cps – was in etwa der geschätzten Summe der biologischen Intelligenz aller lebender Menschen entspricht!

Obwohl die reinen Kapazitäten biologischer und nichtbiologischer Intelligenz dann ungefähr gleich sind, wird die nichtbiologische Intelligenz

bereits überlegen sein, da sie sowohl über die Mustererkennungsfähigkeiten des menschlichen Gehirns als auch über die Speichergenauigkeit und Kommunikationsmöglichkeiten von Maschinen verfügt. Die nichtbiologische Intelligenz wird stets mit maximaler Leistung arbeiten, was man von der biologischen Menschheit nicht behaupten kann, die von ihren theoretischen 10^{26} cps recht wenig Gebrauch macht.

Das Erreichen dieser Rechenleistung ist noch nicht die Singularität, noch keine wirklich drastische Erweiterung unserer Intelligenz. Mitte der 2040er jedoch beträgt die Leistung für eintausend Dollar bereits 10^{26} cps, womit die jährlich produzierte Hardware (im Wert von $\$10^{12}$) etwa eine Milliarde Mal mehr leistet, als heute die gesamte menschliche Intelligenz.⁶⁶

Ich setze als Datum für die Singularität – die eine tiefgreifende und einschneidende Veränderung der menschlichen Möglichkeiten darstellt – das Jahr 2045. Die nichtbiologische Intelligenz, die in diesem Jahr geschaffen werden wird, wird eine Milliarde Mal leistungsfähiger sein als die gesamte menschliche Intelligenz heute.

Das ist dann durchaus ein fundamentaler Wandel – eine tiefgreifende und einschneidende Veränderung der menschlichen Möglichkeiten. Darum setze ich 2045 als Datum für die Singularität an.

Obwohl nichtbiologische Intelligenz dann klar überwiegt, bleibt unsere Zivilisation weiterhin menschlich. Wir überwinden unsere biologische Natur, aber nicht unsere Menschlichkeit. Auf dieses Thema komme ich in **Kapitel 7** zurück.

Bisher haben wir die physikalischen Grenzen der Rechenleistung eines Computers im heute üblichen Laptopformat betrachtet. Im zweiten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts wird Berechnung jedoch größtenteils nicht mehr in rechteckigen Gehäusen stattfinden, sondern überall in unserer

Umwelt verteilt sein: in den Wänden, in Möbeln, in Kleidung und in unseren Körpern und Gehirnen.

Und natürlich wird sich unsere Zivilisation nicht auf Kilogramm-Portionen rechnender Materie beschränken. In **Kapitel 6** untersuchen wir die potenzielle Rechenkapazität eines Planeten in Größe unserer Erde und von Computern so groß wie ganze Sonnensysteme, Galaxien oder das ganze Universum. Erstaunlich bald werden wir über die Mittel – und die Intelligenz – verfügen, um unseren Planeten zu verlassen und das Universum zu erobern.

Speicher- und Recheneffizienz: Stein gegen Gehirn. Speicher- und Recheneffizienz eines Objekts sind nützliche Maßgrößen für unsere Betrachtung der Leistungsgrenzen von Energie und Materie. Sie sind definiert als der Anteil an Speicher beziehungsweise an Berechnungen eines Objekts, der tatsächlich von Nutzen ist. Dabei sollten wir funktionale Äquivalenz berücksichtigen: Wenn ein komplizierter Berechnungsvorgang zwar einen sinnvollen Zweck erfüllt, eine weniger rechenintensive Methode jedoch dasselbe Ergebnis liefert, so sollten wir unserer Bewertung den einfacheren Algorithmus zugrunde legen. In anderen Worten: Wenn zwei Methoden das gleiche Ergebnis liefern, so nehmen wir für beide Methoden den Rechenaufwand der effizienteren Methode an.⁶⁷

Auf diese Weise können wir sehen, welche Strecke die Evolution bereits zurückgelegt hat, auf dem Weg von gänzlich intelligenzfreien Systemen (wie dem Stein, der überhaupt keine *nützlichen* Berechnungen ausführt) bis zur vollkommenen Ausreizung des Rechenpotenzials von Materie. Die natürliche Evolution hat uns bereits ein ganzes Stück vorangebracht – die technische Evolution (die, wie gesagt, die natürliche fortsetzt) wird uns schließlich nah an das absolute Limit bringen.

Wir erinnern uns: Die Atomzustände eines 1kg-Steins kodieren theoretisch eine Datenmenge in der Größenordnung von 10^{27} Bits und die Aktivität der Teilchen entspricht etwa 10^{42} cps. Die relevanten Informationen eines Steins beschränken sich jedoch auf seine ungefähre Form und Oberfläche, somit sind wir eher großzügig, wenn wir ihm eintausend Bits sinnvoller Information zugestehen⁶⁸ – das sind 10^{-24} seiner

theoretischen Kapazität, die Speichereffizienz von Steinen beträgt also 10^{-24} .⁶⁹

Wir können den Stein auch für Berechnungen benutzen, beispielsweise können wir „berechnen“, wie lange es dauert, ihn aus einer bestimmten Höhe fallen zu lassen, indem wir ihn aus besagter Höhe fallen lassen. Die äquivalente Rechenleistung ist hier natürlich denkbar gering: bestenfalls 1 cps – eine Effizienz von 10^{-42} .⁷⁰

Was lässt sich im Vergleich über die Effizienz unseres Gehirns sagen? In diesem Kapitel haben wir gesehen, dass jede der ungefähr 10^{14} Neuronenbindungen schätzungsweise 10^4 Bits Information in Form von Neurotransmitterkonzentrationen, synaptischen Nichtlinearitäten und Dendritenstrukturen enthält – in der Summe also 10^{18} Bits. Ein menschliches Gehirn wiegt etwa gleichviel wie unser Stein (im Rahmen der Größenordnung – eigentlich etwas mehr). Es produziert etwas mehr Wärme als der kalte Stein, doch wir können trotzdem eine theoretische Speicherkapazität von ungefähr 10^{27} Bits annehmen (wenn wir von einem Bit pro Atom ausgehen). Somit ergibt sich eine Speichereffizienz von 10^{-9} .

Dabei ist jedoch funktionale Äquivalenz noch nicht berücksichtigt: Wir sollten die Speichereffizienz nicht anhand der ineffektiven Kodierungsmethoden des Gehirns berechnen. Mit der geschätzten funktionalen Kapazität von 10^{13} Bits beträgt die Effizienz nur noch 10^{-14} . Auf einer logarithmischen Skala liegt das Gehirn damit etwa auf der Mitte zwischen einem Stein und dem ultimativen Laptop. Doch obwohl der technische Fortschritt exponentiell verläuft, ist der Status quo stets von linearen Größen bestimmt – und linear betrachtet stehen wir dem Stein noch deutlich näher als dem ultimativen, kalten Computer.

Wie steht es mit der Recheneffizienz des Gehirns? Auch hier gilt das Prinzip der funktionalen Äquivalenz. Wir gehen also davon aus, dass eine Simulation der Gehirnfunktionen 10^{16} cps benötigt (und nicht 10^{19} unter Berücksichtigung der Eigenheiten einzelner Neuronen). Bei einer theoretischen Rechenkapazität aller Atome des Gehirns von 10^{42} cps beträgt die Recheneffizienz also 10^{-26} – wiederum deutlich näher am Stein als am ultimativen Laptop, selbst mit logarithmischem Maßstab.

Die Speicher- und Berechnungseffizienz unserer Gehirne ist deutlich höher entwickelt als die von präbiologischen Objekten, wie Steinen. Doch in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts erwarten uns noch Verbesserungen um viele Größenordnungen.

Jenseits der Grenzen: Piko- und Femtotechnik – und Rütteln an der Lichtgeschwindigkeit. Wenn wir einzelne Atome für Berechnungen benutzen, so sind für einen ein Kilogramm schweren Computer mit einem Liter Volumen 10^{42} cps das Limit – beziehungsweise 10^{50} , wenn man in Kauf nimmt, dass er (sehr) heiß läuft. Doch physikalische Grenzen sind nicht immer, was sie zu sein scheinen: Sie pflegen regelmäßig durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse überwunden zu werden. So herrschte in den Anfangszeiten der Luftfahrt noch die einstimmige Lehrmeinung, dass Düsenflugzeuge physikalisch unmöglich seien.⁷¹

Die bisher besprochenen Schranken sind nach unserem heutigen Wissensstand die physikalischen Grenzen der Nanotechnik. Doch was ist mit Pikotechnik im Bereich von Billionstel (10^{-12}) Metern und Femtotechnik (10^{-15} Meter)? Das würde Berechnung durch subatomare Teilchen bedeuten – und noch größere Leistung und Dichte ermöglichen.

Wir haben zumindest ein paar erste Beispiele für Pikotechnik. Deutsche Wissenschaftler entwickelten ein Rasterkraftmikroskop, das Atommerkmale von nur siebenundsiebzig Pikometern Durchmesser sichtbar macht.⁷² Forscher der University of California in Santa Barbara entwickelten eine noch hochauflösendere Technik: Ihr Gerät benutzt einen Galliumarsenidkristall als physischen Taster und ein Sensorsystem, das Biegungen der Messspitze um nur einen Pikometer messen kann – genau genug, um die Heisenbergsche Unschärferelation experimentell nachzuweisen.⁷³

Im selben Zeitraum präsentierte man an der Cornell University ein röntgenbasiertes Aufnahmeverfahren, das die Bewegungen einzelner Elektronen aufzeichnen kann. Jedes Einzelbild entspricht dabei vier Attosekunden (10^{-18} Sekunden; also vier Milliardstel Milliardstel Sekunden).⁷⁴ Die räumliche Auflösung beträgt ein Ångström, also 10^{-10} Meter beziehungsweise 100 Pikometer.

Unser Verständnis von Materie auf dieser Ebene reicht nicht aus, um ernsthaft über Rechnertechnik-Paradigmen nachzudenken – noch gibt es kein *Engines of Creation* (Eric Drexlers Bibel der Nanotechnik von 1986) für Piko- oder Femtotechnik. Doch alle soweit vorgeschlagenen mathematischen Modelle für das Verhalten von Materie und Energie in diesen Dimensionen basieren auf berechenbaren Transformationen – und solche Transformationen sind häufig eine potenzielle Grundlage für universelle Berechnungen (das heißt, dass man damit theoretisch einen Allzweckcomputer bauen könnte). Im Piko- und Femtometerbereich könnte das ebenso zutreffen.

Falls der Theorie nach universelle Berechnungen auf diesen physikalischen Ebenen möglich sein sollten, hätten wir natürlich noch längst nicht die Technik um entsprechende Rechnerkomponenten zu erzeugen und anzusteuern. Wir sähen uns ähnlichen Herausforderungen gegenüber, wie derzeit in der Nanotechnik – welche wir derzeit zunehmend meistern. Zum jetzigen Zeitpunkt sind Piko- und Femtocomputer reine Spekulation. Doch Nanotechnik wird uns einen massiven Intelligenzgewinn beschern, und falls Berechnung in noch kleineren Maßstäben überhaupt möglich ist, dann werden wir mit unseren verbesserten Fähigkeiten auch irgendwann entsprechende technische Lösungen finden. Die Frage ist also nicht, ob Menschen, wie wir sie heute kennen, Piko- und Femtocomputer erschaffen können, sondern ob unsere ungleich (Billionen von Billionen Mal) größere, Nanotechnik-basierte, zukünftige Intelligenz dazu in der Lage ist. Ich persönlich glaube daran – diese Spekulationen spielen jedoch keine Rolle für die Vorhersagen dieses Buches betreffend die Singularität.

Während Berechnungen immer weniger Platz brauchen, können wir Computer größer machen – das heißt, wir können sehr kleine Komponenten in großem Stil vervielfachen. Mit voll ausgereifter Nanotechnik können wir selbstreplizierende Computerressourcen erzeugen und somit jegliche Masse und Energie sehr schnell in intelligente Formen überführen. Allerdings stoßen wir dabei an das Limit der Lichtgeschwindigkeit, da die Materie des Universums über sehr weite Strecken verteilt ist.

Wie wir später sehen werden, gibt es zumindest Vermutungen, dass die Lichtgeschwindigkeit nicht völlig unantastbar ist. Steve Lamoreaux und

Justin Togerson (Los Alamos National Laboratory) untersuchten die Daten eines natürlichen Kernreaktors im heutigen Westafrika, in dem vor zwei Milliarden Jahren eine mehrere Hunderttausend Jahre andauernde Kernspaltungsreaktion ablief.⁷⁵ Beim Vergleich dort gefundener radioaktiver Isotope mit Isotopen aus heutigen künstlichen Reaktoren stellten sie fest, dass sich die Feinstrukturkonstante α (welche die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung bestimmt) über die letzten zwei Milliarden Jahre scheinbar verändert hat. Das ist physikalisch von großer Bedeutung, da α umgekehrt proportional zur Lichtgeschwindigkeit ist – und beide bis anhin als unveränderbare Konstanten galten. Nun scheint sich α um einen Anteil von $4,5 \times 10^8$ verringert zu haben – falls sich das bestätigt, so wäre die Lichtgeschwindigkeit gestiegen.

Solch abenteuerliche Ergebnisse müssen natürlich erst sorgfältig überprüft werden. Falls sie sich bestätigen, sind sie von großer Bedeutung für die Zukunft unserer Zivilisation. Denn falls sich die Lichtgeschwindigkeit wirklich geändert hat, dann vermutlich nicht ohne Grund; und wenn sie infolge bestimmter Änderungen in den Umständen gestiegen ist, so öffnet sich uns damit ein Fenster – nur einen winzigen Spalt, gerade breit genug um es mittels künftiger Technik und Intelligenz weit aufzureißen. Es wäre genau die Art von Vorlage, die ein Techniker braucht; allzu oft sind es unscheinbare Naturphänomene, die den Anstoß geben, und schließlich finden sich Mittel und Wege, diese Phänomene zu verstärken und auszubeuten.

Vielleicht gelingt es uns nicht, die Lichtgeschwindigkeit über große räumliche Distanzen hinweg zu überschreiten, aber bereits im Rahmen von Computerschaltkreisen hätte das Überschreiten der Lichtgeschwindigkeit weitreichende Konsequenzen für die Grenzen der Rechenkapazität. Denn schon heute ist die Lichtgeschwindigkeit in der Rechnertechnik ein limitierender Faktor. Sie zu erhöhen bedeutet, die absoluten Grenzen der Rechenleistung zu erweitern. In **Kapitel 6** lernen wir einige interessante Ideen kennen, die darauf zielen, die Lichtgeschwindigkeit zu steigern oder zu umgehen. Natürlich ist all das bisher reine Spekulation und soll bei unseren Überlegungen zur Singularität keine Rolle spielen.

Reise in die Vergangenheit. Ebenso faszinierend – und ebenso spekulativ – ist die Möglichkeit durch ein „Wormloch“ im Raumzeitkontinuum in die Vergangenheit zu reisen. Todd Brun (ein theoretischer Physiker am Institute for Advanced Studies in Princeton) hat sich theoretisch mit Berechnungen mittels sogenannter „closed timelike curves“* (CTC) beschäftigt. Ihm zufolge kann man „Informationen durch CTCs in ihren eigenen Rückwärtslichtkegel übermitteln“.⁷⁶

Brun beschreibt nicht den Aufbau eines solchen Systems, sondern weist lediglich nach, dass es mit den Gesetzen der Physik konsistent ist. Sein hypothetischer Zeitreise-Computer führt auch nicht zum berühmten Großvater-Paradox, das entsteht, wenn beispielsweise eine Person A in die Vergangenheit reist und ihren Großvater umbringt: Person A würde nie geboren, der Großvater nicht ermordet, weshalb Person A dann doch existiert und ihren Großvater tötet... und so weiter.

Mit Bruns Berechnungs-Zeitschleife stellt sich dieses Problem scheinbar nicht, da die Vergangenheit nicht beeinflusst wird: Das System produziert eine von vorneherein feststehende Antwort auf eine bestimmte Frage. Die Lösung muss eindeutig sein, und darf erst gegeben werden, nachdem die Frage gestellt wurde – der Berechnungsprozess kann jedoch aufgrund der CTC schon zeitlich davor stattfinden. Die Lösung kann auch in der Zukunft berechnet und durch die CTC in die Gegenwart übermittelt werden (allerdings nicht in die Vergangenheit, bevor die Frage gestellt wurde, denn damit entstünde das Großvater-Paradox). Möglicherweise gibt es zahlreiche Hindernisse und Einschränkungen für einen solchen Vorgang, die wir noch überhaupt nicht erkennen. Doch falls das Prinzip tatsächlich funktioniert, erhöht es natürlich enorm die lokalen Rechenkapazitäten. Doch auch diese Mutmaßungen dienen freilich nicht als Grundlage für meine Aussagen über die Singularität.

ERIC DREXLER: *Also, ich weiß nicht, Ray. Ich bin da recht pessimistisch, was Pikotechnik betrifft. Ich wüsste nicht, wie sich mit den uns bekannten stabilen Partikeln irgendwelche Pikostrukturen bilden ließen – außer durch die extremen Kräfte in kollabierten Sternen. Und alles, was dabei entsteht, sind millionenfach verdichtete, metallartige*

Klumpen – nicht sehr vielversprechend und außerdem weitab von unserem Sonnensystem. Es wäre was anderes, wenn es stabile Teilchen gäbe, in der Art von Elektronen, aber hundertmal so schwer. Aber so etwas kommt in der Physik nicht vor.

RAY: *Aber wir manipulieren schon heute subatomare Partikel in Teilchenbeschleunigern, die mit einem Neutronenstern wenig gemein haben. Die Geräte für bestimmte Manipulationen von Elektronen und Ähnlichem passen mittlerweile sogar auf den Schreibtisch. Kürzlich haben Forscher ein Photon eingefangen und zum Stillstand gebracht!*

ERIC: *Ja, aber was heißt schon Manipulation? Wenn man so will, ist doch jede Technik irgendwo Pikotechnik, weil alles letzten Endes aus subatomaren Teilchen besteht, Teilchenbeschleuniger produzieren subatomare Trümmerhaufen – keine Maschinen oder Schaltkreise.*

RAY: *Ich behaupte ja nicht, dass schon alle konzeptuellen Probleme der Pikotechnik gelöst sind. Dafür lasse ich dir noch Zeit bis 2072.*

ERIC: *Aha – schön, dass ich in deiner Vorstellung so alt werde!*

RAY: *Klar, wenn du – wie ich – versuchst alle medizinischen Entwicklungen und Verbesserungen mitzunehmen, dann solltest du bis dahin topfit sein.*

MOLLY 2104: *Ja, ein paar von euch Baby-Boomern haben durchgehalten. Die meisten haben es jedoch versäumt, die Möglichkeiten von 2004 voll auszunutzen, um lange genug zu leben, um von der biotechnischen Revolution im darauffolgenden Jahrzehnt zu profitieren – und der Nanotechnik im übernächsten Jahrzehnt.*

MOLLY 2004: *Hey Molly, du musst ja einiges auf dem Kasten haben, ich meine, wenn man 2080 in zehn Mikrosekunden so viel denken kann, wie zehn Milliarden Hirne in zehntausend Jahren – und 2104 seid ihr ja bestimmt noch weiter, und wahrscheinlich gibst du auch mehr als tausend Dollar für Hardware aus...?*

MOLLY 2104: *Im Schnitt benutze ich Rechenleistung im Wert von mehreren Millionen – bei Bedarf auch Milliarden.*

MOLLY 2004: *Das kann man sich ja kaum vorstellen.*

MOLLY 2104: *Naja, ich sage mal: ich bin schlau, wenn es darauf ankommt.*

MOLLY 2004: *Du klingst gar nicht so superschlau.*

MOLLY 2104: *Ich versuche mich eben deinem Niveau anzupassen...*

MOLLY 2004: *Hey! Jetzt mal halblang, Madame 2104...*

GEORGE 2048: *Meine Damen, ihr seid doch alle beide sehr niveauvoll und bezaubernd.*

MOLLY 2004: *Sag das meinem zweiten Ich hier – die hält sich für Millionen Mal klüger.*

GEORGE 2048: *Vergiss nicht: Sie ist deine Zukunft. Übrigens finde ich, biologische Frauen haben einen ganz besonderen Charme.*

MOLLY 2104: *Was weißt du denn schon von biologischen Frauen?*

GEORGE 2048: *Ich habe viel über sie gelesen – und die Bekanntschaft mit ein paar ziemlich präzisen Simulationen gemacht.*

MOLLY 2004: *Ich glaube ihr beiden verpasst da was, ohne es zu wissen.*

GEORGE 2048: *Kann ich mir nicht vorstellen.*

MOLLY 2104: *Definitiv nicht.*

MOLLY 2004: *Habe ich auch nicht erwartet... Aber eine Sache an der Zukunft finde ich echt cool.*

MOLLY 2104: *Nur eine?*

MOLLY 2004: *Ihr könnt eure Gedanken komplett mit denen einer anderen Person verschmelzen lassen und dabei die eigene Identität behalten.*

MOLLY 2104: *Ja, in der richtigen Situation – und mit der richtigen Person – ist das wirklich eine großartige Erfahrung.*

MOLLY 2004: *So wie Liebe?*

MOLLY 2104: *Wie die Liebe. Ultimative Hingabe.*

GEORGE 2048: *Ich glaube, du wirst es selbst herausfinden Molly 2004.*

MOLLY 2104: *Du musst es wissen George, du bist schließlich die erste Person, mit der ich es getan habe.*

KAPITEL 4

Intelligente Software

Ein Reverse Engineering des Gehirns

Es gibt Gründe zur Annahme, dass wir einen kritischen Punkt überschritten haben, und dass es uns innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte gelingt, die Funktionsweise des Gehirns zu ergründen. Dieser Optimismus fußt auf mehreren messbaren Entwicklungen und einer einfachen Tatsache, die sich im Lauf der Geschichte wiederholt bestätigt hat: *Wissenschaftlicher Fortschritt wird stets durch eine neue Technik ausgelöst, die uns erlaubt, Dinge zu sehen, die uns zuvor verborgen blieben.* Ungefähr mit Beginn des einundzwanzigsten Jahrhunderts haben unsere neurowissenschaftlichen Kenntnisse und die Leistung unserer Computer offensichtlich eine kritische Masse erreicht. Erstmals in der Geschichte verfügen wir über genug Wissen über unsere Gehirne und ausreichend fortschrittliche Technik, um uns ernsthaft an die Konstruktion eines überprüfbaren, hochaufgelösten Echtzeitmodells eines signifikanten Anteils unserer eigenen Intelligenz zu machen.

LLOYD WATTS, NEUROWISSENSCHAFTLER¹

Zum ersten Mal können wir die Gesamtheit der Vorgänge im Gehirn so klar und umfassend beobachten, dass es uns möglich sein dürfte, all die Programme zu ergründen, die hinter seinen großartigen Fähigkeiten stecken.

J. G. TAYLOR, B. HORWITZ, K. J. FRISTON, NEUROWISSENSCHAFTLER²

Das Gehirn ist gut: Es ist der Beweis, dass bestimmte Anordnungen von Materie in der Lage sind, einen Verstand zu haben, Schlüsse zu ziehen, Muster zu erkennen, zu lernen und viele interessante Aufgaben zu bewältigen. Darum können wir uns in der Hirnforschung neue Inspiration für die Entwicklung von Systemen holen. [...] Das Gehirn ist schlecht: Es ist ein historisch gewachsenes, wirres System, in dem viele Vorgänge nur aufgrund evolutionärer Zufälle gegeben sind. [...] Andererseits ist es offenbar recht robust (schließlich überleben wir damit) und widersteht großen Veränderungen und Umwelteinflüssen, weshalb wir vom Gehirn vielleicht vor allem lernen können, elastische komplexe Systeme zu bauen, die sich autonom organisieren. [...] Die Abläufe innerhalb einer Nervenzelle sind komplex, aber auf einer höheren Ebene lassen sich Neuronen als recht simple Objekte betrachten, die sich flexibel vernetzen lassen. Auch in kortikalen Netzen herrscht lokal betrachtet großes Durcheinander – während sie, auf einer höheren Ebene betrachtet, gar nicht so komplex sind. Es ist nur wahrscheinlich, dass Evolutionsprodukte letztlich aus einer Reihe von Modulen und Konzepten bestehen, die sich immer wiederholen, und wenn wir diese erkennen und verstehen, wie sie sich wechselseitig beeinflussen, so können wir etwas Ähnliches bauen.

Reverse Engineering des Gehirns: ein Überblick

Menschenartige Intelligenz kombiniert mit der Computern inhärenten überlegenen Geschwindigkeit, Präzision und Kommunikationsfähigkeit wird eine unschlagbare Mischung ergeben. Die bisher erforschten und entwickelten KI-Modelle basieren jedoch größtenteils nicht unbedingt auf menschlichen Gehirnfunktionen – aus dem einfachen Grund, dass wir bisher nicht über die Mittel verfügten, detaillierte Modelle menschlicher Kognition zu entwickeln.

Unsere Möglichkeiten, ein Reverse Engineering des Gehirns zu betreiben (das heißt, das Gehirn zu durchleuchten, Modelle davon zu erstellen, und Teile davon zu simulieren), wachsen jedoch exponentiell. Letztendlich werden wir die Vorgänge, die hinter der Gesamtheit unseres Denkens stehen, völlig ergründen – und mit diesem Wissen wird uns ein mächtiges Werkzeug für die Entwicklung intelligenter Software an die Hand gegeben. Wir werden die Methoden des Gehirns anpassen, verbessern und erweitern, indem wir sie auf Computer übertragen, die weit leistungsfähiger sind als die elektrochemische Arbeitsweise biologischer neuronaler Netze. Zudem erlangen wir einen genauen Einblick in unser eigenes Selbst – ein wichtiger Nebeneffekt dieses Großprojekts. Des Weiteren werden wir bessere Behandlungsmethoden für Alzheimer, Parkinson, sensorische Behinderungen und dergleichen Erkrankungen des Nervensystems finden – und zu guter Letzt werden wir unsere Intelligenz drastisch erweitern.

Neue bildgebende Verfahren und Modellierungsmethoden. Der erste Schritt des Reverse Engineering ist der Blick hinter die Schädeldecke, um zu sehen, wie das Gehirn funktioniert. Bisher war das nur mit recht plumpen Mitteln möglich, doch das ändert sich: Mittlerweile steht uns eine ganze Reihe neuer bildgebender Verfahren mit stark verbesserter räumlicher und zeitlicher Auflösung, Preis-Leistung und Bandbreite zur Verfügung.

Gleichzeitig sammeln wir haufenweise Daten über Beschaffenheit und Dynamik von Komponenten und Abläufen des Gehirns – bei einzelnen Synapsen angefangen bis hin zu ganzen Teilorganen, wie dem Kleinhirn, das die Hälfte aller Nervenzellen des Gehirns ausmacht. Umfangreiche Datenbanken katalogisieren diesen exponentiell wachsenden neurologischen Wissensschatz.³

Unsere Wissenschaftler haben sich als fähig erwiesen, solche Informationen zügig auszuwerten und daraus Modelle und funktionierende Simulationen zu erstellen. Diese Simulationen beruhen auf den mathematischen Prinzipien der Komplexitätstheorie sowie chaotischer Berechnung* und liefern schon heute Ergebnisse, die dem Verhalten von echten Menschen und Tieren in Experimenten sehr nahe kommen.

Wie in **Kapitel 2** bemerkt, beschleunigt sich die Entwicklung der Scan- und Berechnungsmethoden, auf denen das Reverse Engineering des Gehirns basiert – ähnlich wie damals die Technik für das Human Genome Project. In der Nanobot-Ära (siehe den Abschnitt „Scannen mit Nanobots“ auf **Seite 163**) werden wir das Gehirn mit erstklassiger räumlicher und zeitlicher Auflösung *von innen* scannen können.⁴ Unseren Möglichkeiten, die Arbeitsweise menschlicher Intelligenz nachzuvollziehen und auf die immer besseren Berechnungsmedien der kommenden Jahrzehnte zu übertragen, sind keine Grenzen gesetzt. Das menschliche Gehirn ist eine komplexe Hierarchie komplexer Systeme – aber nicht so komplex, dass wir es nicht erfassen könnten.

Die Software des Gehirns. Das Preis-Leistungs-Verhältnis von Berechnung verdoppelt sich jährlich. Wie wir gesehen haben, wird die für eine Emulation menschlicher Intelligenz nötige Rechenleistung in weniger als zwanzig Jahren verfügbar sein.⁵ Eine Grundvoraussetzung für das Eintreten der Singularität ist, dass nichtbiologische Medien in der Lage sind, die Vielfalt, Feinsinnigkeit und Tiefgründigkeit menschlichen Denkens zu emulieren. Denn Hardware mit der Rechenkapazität eines Menschen – oder eines ganzen Dorfes – hat nicht automatisch auch menschliche Fähigkeiten. (Damit gemeint sind all die verschiedenen subtilen Formen menschlicher Intelligenz, einschließlich musikalischer und

künstlerischer Fähigkeiten, Kreativität, physikalischer Fortbewegung und Emotionen). Rechenleistung ist eine notwendige Bedingung für Intelligenz, aber keine hinreichende. Entscheidend sind Inhalt und Organisation der Ressourcen – die Intelligenz-Software –, und genau darauf zielt das Reverse Engineering des Gehirns.

Sobald ein Computer menschliche Intelligenz erlangt, wird er sie auch unweigerlich übertreffen. Nichtbiologische Intelligenz hat den entscheidenden Vorteil, ihr Wissen schnell weitergeben zu können. Wenn ein Mensch Französisch gelernt oder *Krieg und Frieden* gelesen hat, kann ich mir das Gelernte nicht einfach von ihm herunterladen – ich muss es mir auf dieselbe mühsame Weise aneignen, wie er es getan hat. Ich habe (noch) keinen direkten Zugriff auf sein Wissen, das in Form von Neurotransmittern (Chemikalien in Synapsen, welche die Kommunikation von Neuronen ermöglichen) und interneuronalen Verknüpfungen (durch die Axone und Dendriten von Nervenzellen) vorliegt.

Ganz anders bei maschineller Intelligenz. In einem meiner Unternehmen verbrachten wir Jahre damit, einem mit Mustererkennungsprogrammen bespielten Testrechner beizubringen, gesprochene Sprache zu erkennen.⁶ Wir fütterten ihn mit Tausenden Stunden von Aufnahmen, korrigierten die Fehler und trainierten geduldig „chaotische“ selbstorganisierte Algorithmen (Programme, die, von einem mehr oder weniger zufälligen Ausgangszustand ausgehend, ihre eigenen Regeln anpassen und deren Resultat nicht vorhersehbar ist). Schließlich tat der Computer seinen Dienst zu unserer Zufriedenheit. Dieser Lernprozess muss (anders als bei menschlichen Kindern) nicht jedes Mal wiederholt werden, wenn wir die Sprachfunktion auf einem neuen PC installieren wollen; wir können das bestehende Softwaremuster innerhalb weniger Sekunden herunterladen.

Analytische versus neuromorphe Gehirnmodelle. Der Unterschied zwischen menschlicher und moderner künstlicher Intelligenz lässt sich daran veranschaulichen, wie sie jeweils Schachprobleme lösen. Während Menschen nach bestimmten Mustern suchen, berechnen Maschinen weitverzweigte logische „Bäume“ möglicher Züge und Gegenzüge. Bislang beruht Technik (jeglicher Art) weitgehend auf solchen analytischen „top-

down“-Methoden. Wir versuchen beispielsweise nicht, unsere Flugzeuge der Physiologie und Mechanik von Vögeln anzugleichen. Doch indem sich unsere Reverse-Engineering-Methoden weiterentwickeln, bewegt sich die Technik immer mehr in Richtung Emulation der Natur – allerdings mit besserem Baumaterial.

Da leuchtet es natürlich ein, für die Entwicklung intelligenter Software direkt das Musterbeispiel für intelligente Prozesse anzuzapfen: das menschliche Gehirn. Sein „Entwickler“ (die Evolution) arbeitete mehrere Milliarden Jahre an diesem Meisterstück, und nun steht es uns als Vorlage zur Verfügung. Es ist in einem Schädel verpackt, doch die passende Technik offenbart uns seine Geheimnisse – und die sind weder patentiert noch urheberrechtlich geschützt. (Wobei das nicht lange so bleiben wird; erste entsprechende Patentanträge sind bereits eingereicht).⁷ Gehirnscans und -modelle werden uns Billionen von Bytes an Informationen auf vielen Ebenen liefern, die wir benutzen werden, um immer intelligentere, parallele – und insbesondere selbstorganisierte – Algorithmen für unsere Maschinen zu entwickeln.

Dank selbstorganisierender Technik brauchen wir nicht jede einzelne Neuronenbindung nachzubauen. Jedes Gehirnareal enthält eine ordentliche Portion Redundanz. Wie sich zeigt, sind Gehirnmodelle höherer Ebenen oft einfacher als Modelle ihrer neuronalen Komponenten.

Wie komplex ist das Gehirn? Das menschliche Gehirn enthält Informationen in der Größenordnung von einer Milliarde mal einer Milliarde Bits (siehe **Kapitel 3**). Doch sein ursprünglicher Aufbau beruht auf unserem recht kompakten Genom. Dieses enthält achthundert Millionen Bytes, die größtenteils redundant sind, somit verbleiben (nach Kompression) etwa dreißig bis hundert Millionen Bytes (unter 10^9 Bits) – kleiner als Microsoft Word.⁸ Der Vollständigkeit halber müssen wir auch „epigenetische Information“ (die entscheidet, wann in welcher Zelle welches Protein erzeugt wird) sowie die gesamte Protein-Replikations-Maschinerie (Ribosomen und eine Reihe von Enzymen) in die Rechnung mit einbeziehen; das ändert jedoch nichts an der Größenordnung.⁹ Die

Beschreibung des Ausgangszustands des Gehirns macht dabei etwas mehr als die Hälfte der genetischen und epigenetischen Informationen aus.

Natürlich wächst die Komplexität unseres Gehirns, indem wir mit der Welt interagieren (und zwar etwa auf das Milliardenfache der Genomkomplexität).¹⁰ Doch jede Hirnregion enthält repetitive Muster, darum muss ein erfolgreiches Reverse Engineering der Gehirn-Algorithmen nicht jedes letzte Detail berücksichtigen. Das elementare Verknüpfungsmuster des Kleinhirns beispielsweise liegt in milliardenfacher Ausfertigung vor, ist aber nur ein Mal im Genom beschrieben. Mithilfe der Informationen, die uns Gehirnschans und -modelle liefern, können wir Software entwickeln, die einer neuromorphen Simulation gleichkommt (also dem Gehirn funktional vollständig äquivalent ist).

Die Entwicklung von Modellen und Simulationen folgt der Verfügbarkeit neuer Gehirnaufnahmen und von Informationen über die Neuronenstruktur auf den Schritt. Weltweit über fünfzigtausend Neurowissenschaftler publizieren in über dreitausend Fachzeitschriften.¹¹ Das Feld ist breit gefächert – Forscher und Ingenieure arbeiten gemeinsam an neuen Scan- und Testverfahren und entwickeln Modelle und Theorien in unterschiedlichsten Bereichen. Selbst Leuten vom Fach ist daher oft nicht klar, was für Dimensionen dieser Forschungszweig mittlerweile angenommen hat.

Modellierung. Die Gehirnsimulationen der Neurowissenschaften stützen sich auf verschiedene Informationsquellen: bildgebende Verfahren, Modelle von neuronalen Netzen, Neuronenmodelle und psychophysische Experimente. Wie zuvor erwähnt, modellierte der Forscher Lloyd Watts anhand neurobiologischer Untersuchungen (von Verknüpfungsmustern und bestimmten Neuronenarten) einen beträchtlichen Teil der auditorischen Verarbeitung im menschlichen Gehirn. Sein Modell implementiert fünf parallele Verarbeitungswege und erlaubt, nach jedem neuronalen Verarbeitungsschritt das Zwischenergebnis zu begutachten. Zugleich aber kann das Modell Klangdaten in Echtzeit verarbeiten und, ähnlich wie das menschliche Gehirn, Geräusche lokalisieren. Das Projekt ist zwar noch nicht abgeschlossen, ist aber jetzt schon ein Beweis dafür, dass wir

neurobiologische Modelle und Daten über die Verknüpfungen im Gehirn in funktionierende Simulationen umsetzen können.

Wie unter anderem von Hans Moravec vermutet, benötigen solcherlei effiziente Simulationen etwa ein Tausendstel der für eine exakte Nachbildung aller nichtlinearer subneuronaler Strukturen (Dendriten, Synapsen, usw.) erforderlichen Rechenzeit. (Siehe **Kapitel 3**: etwa 10^{16} cps für funktionale Simulation gegenüber 10^{19} cps für die Simulation aller subneuronaler Nichtlinearitäten).¹²

Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen heutiger Elektronik und biochemischen neuronalen Signalen beträgt mindestens eine Million zu eins. Diese Ineffizienz zieht sich durch alle Bereiche der Biologie, hauptsächlich, weil der Baukasten der Natur über eine sehr begrenzte Materialauswahl verfügt: Alle biologischen Mechanismen und Systeme basieren auf Zellen, welche ihrerseits aus einer begrenzten Anzahl von Proteinen aufgebaut sind. Proteine sind zwar dreidimensional, jedoch stets aus linearen (eindimensionalen) Aminosäureketten gefaltet.

Die Zwiebel schälen. Das Gehirn ist kein großes Datenverarbeitungsorgan, sondern vielmehr ein verworrenes Konglomerat Hunderter spezialisierter Einzelsysteme. Wir sind gerade dabei „die Zwiebel zu schälen“ und die einzelnen Funktionen dieser eng verschlungenen Systeme zu ergründen. So wie für die auditorischen Areale (siehe den Abschnitt „Ein anderes Beispiel: Watts Modell des auditorischen Systems“ auf **Seite 183**), werden wir auch für alle anderen Gehirnbereiche detaillierte, funktionstüchtige Replikate entwickeln – sobald entsprechende Nervenzellmodelle und neuronale Daten verfügbar sind.

Die Algorithmen für Gehirnmodelle unterscheiden sich zumeist von den in der modernen Softwaretechnik gebräuchlichen sequenziellen, logischen Methoden. Die Verarbeitung im Gehirn verläuft weitgehend selbstorganisiert, chaotisch und holografisch (das heißt, Informationen sind dabei räumlich verteilt). Das Gehirn arbeitet massiv parallel und beruht auf digital gesteuerten Analogverfahren. Eine Reihe von Projekten hat gezeigt, dass wir fähig sind, diese Methoden zu begreifen.

Wenn die Algorithmen eines bestimmten Areal erfasst sind, gilt es, sie zu verfeinern und zu erweitern und schließlich in eine künstliche Simulation zu implementieren. Somit werden sie auf ein Berechnungsmedium übertragen, das schon heute schneller ist als neuronale Schaltungen. (Moderne Computer führen Berechnungen in milliardstel Sekunden, Neuronen dagegen in tausendstel Sekunden aus). Zudem können wir sie mit den bereits bekannten Methoden für die Konstruktion intelligenter Maschinen kombinieren.

Ist das Gehirn ein Computer?

Die Antwort auf diese Frage hängt davon ab, was man unter einem „Computer“ versteht. Heute sind damit zumeist digitale Maschinen gemeint, die mit extrem hoher Frequenz einzelne (oder wenige parallele) Berechnungen durchführen. Das menschliche Gehirn kombiniert digitale und analoge Methoden, vollführt allerdings die meisten Berechnungen im analogen (realzahligen) Bereich, mithilfe von Neurotransmittern und ähnlichen Mechanismen. Das Gehirn arbeitet zwar extrem langsam (im Normalfall mit zweihundert Operationen pro Sekunde), aber dafür massiv parallel – genauer gesagt arbeiten fast alle seine Neuronen gleichzeitig und schaffen damit bis zu einer Billion simultane Berechnungen.

Die massive Parallelität unseres Gehirns ist der Schlüssel zu seinen Mustererkennungsfähigkeiten, die einen Grundpfeiler unserer Intelligenz darstellen. Die Neuronen in Säugetierhirnen vollziehen einen chaotischen Gesellschaftstanz (mit vielen zufälligen Interaktionen). Wenn das neuronale Netz gut trainiert ist, entsteht dabei letztlich ein stabiles Muster, welches die Antwort des Netzes darstellt. Computer sind dagegen bislang nur in sehr geringem Maße parallelisiert. Jedoch spricht nichts dagegen, dass sich das Arbeitsprinzip des Gehirns auf nichtbiologische Äquivalente übertragen lässt. Tatsächlich gibt es bereits überall auf der Welt entsprechende – erfolgreiche – Bestrebungen. Mein eigenes Fachgebiet ist Mustererkennung und ich arbeite seit etwa vierzig Jahren in Projekten, die auf ebensolche Formen trainierbarer, nichtdeterministischer Software setzen.

Viele der Organisationsprinzipien des Gehirns können mit ausreichend schnellen konventionellen Computern effektiv simuliert werden. Von der Natur übernommene Konzepte werden, wie ich glaube, für zukünftige Berechnungstechniken eine wichtige Rolle spielen. Wir erinnern uns: Zu allen analogen Berechnungen gibt es funktionsäquivalente digitale Entsprechungen, das heißt, ein digitaler Computer kann theoretisch sämtliche Funktionen eines digital-analogen Hybridnetzes erfüllen. Die Umkehrung gilt jedoch nicht: Ein analoger Computer kann nicht alle Funktionen eines digitalen Computers erfüllen.

Analoge Computer haben jedoch einen Vorteil: Sie sind potenziell Tausende Male effizienter. Für analoge Berechnungen genügen oft wenige Transistoren oder – im Fall von Nervensystemen – bestimmte elektrochemische Prozesse. Eine digitale Berechnung erfordert dagegen stets Tausende oder gar Zehntausende Transistoren. Dieser Vorteil wird wiederum aufgewogen durch die einfache Programmierbarkeit (und Modifizierbarkeit) digitaler Simulationen.

Einige Hauptunterschiede zwischen dem Gehirn und konventionellen Computern:

- *Das Gehirn ist lahm...* Die Erholungszeit von Synapsen und die neuronale Refraktärzeit (die Zeitspanne, bis ein Neuron und seine Synapsen nach einer Aktivierung wieder einsatzbereit sind) sind so lang, dass nur wenige Taktzyklen pro Mustererkennungsvorgang zur Verfügung stehen. Funktionale Magnetresonanztomografie und Magnetoenzephalografie haben gezeigt, dass Entscheidungen, die keine Iteration (mehrmalige Durchführung bestimmter Verarbeitungsschritte) erfordern, scheinbar innerhalb eines einzelnen neuronalen Aktivierungszyklus (unter zwanzig Millisekunden) getroffen werden. Objekterkennung dauert etwa 150 Millisekunden, weshalb, selbst wenn wir „über etwas nachdenken“, allenfalls einige Hunderttausend Operationen stattfinden, und nicht viele Milliarden, wie bei Computern.
- *...aber massiv parallel.* Das Gehirn hat um die einhundert Billionen Neuronenbindungen, die potenziell alle gleichzeitig Informationen verarbeiten können. Aus diesen Faktoren (langsame Taktfrequenz und starke Parallelität) haben wir zuvor die theoretische

Rechenkapazität des menschlichen Gehirns errechnet.

Die größten Supercomputer werden bald diese Kapazität erreichen. Gegenwärtig überschreiten Supercomputer (die unter anderem von populären Suchmaschinen eingesetzt werden) bereits 10^{14} cps – die Untergrenze unserer Schätzungen für funktionale Gehirnsimulation in **Kapitel 3**. Computer müssen nicht denselben Grad an Parallelisierung erreichen wie das Gehirn, solange es nur gelingt, dessen Parallelität zu simulieren und dabei dieselbe Rechen- und Speicherkapazität zu erreichen.

- *Das Gehirn kombiniert analoge und digitale Prozesse.* Die Topologie des Gehirns ist im Prinzip digital: Zwei Neuronen sind entweder verknüpft oder nicht. Die Aktivierung eines Axons ist nahezu – wenn auch nicht völlig – digital. Fast alle Gehirnfunktionen sind jedoch analog und von Nichtlinearitäten (plötzliche Ergebnisänderungen anstelle von gleichmäßigen Übergängen) bestimmt, welche die Komplexität unserer klassischen Neuronenmodelle weit übersteigen. Doch die nichtlinearen Charakteristiken von Neuronen und ihren Komponenten (Dendriten, Dornfortsätze, Ionenkanäle, Axone) sind durch die Mathematik nichtlinearer Systeme erfassbar, welche uns Modelle liefert, die sich mit beliebiger Genauigkeit digital simulieren lassen. Wie schon erwähnt, könnten hierbei Transistoren im Analogbetrieb die Effizienz – laut Carver Mead – um drei bis vier Größenordnungen verbessern.¹³
- *Das Gehirn passt sich an.* Dendriten bilden andauernd neue Dornfortsätze und Synapsen. Die Topologie und Leitfähigkeit von Dendriten und ihren Dornfortsätzen passt sich ständig neu an. Das Nervensystem ist auf allen Ebenen selbstorganisiert. Die in Computern für Mustererkennung eingesetzten mathematischen Techniken (beispielsweise künstliche neuronale Netze und Markov-Modelle) sind sehr viel primitiver als die des Gehirns, doch es gibt bereits erste Erfolge mit selbstorganisierten Modellen.¹⁴ Heutige Computer sind zwar noch nicht wirklich fähig, sich physikalisch anzupassen (abgesehen von ersten „selbstheilenden Systemen“), doch lassen sich entsprechende Effekte auf der Softwareebene simulieren.¹⁵ In Zukunft wird dies auch auf der Hardwareebene möglich sein, wobei die Softwarelösung möglicherweise

vorzuziehen ist, da sie dem Programmierer mehr Flexibilität einräumt.

- *Die Einzelheiten des Gehirns sind weitgehend zufällig.* Das Gehirn ist in allen Bereichen von stochastischen (in kontrolliertem Rahmen zufälligen) Prozessen bestimmt. Es ist ebenso wenig nötig, jede kleine Beule eines Dendriten zu modellieren, wie man jeden Kratzer auf der Oberfläche eines Transistors kennen muss, um zu verstehen, wie ein Computer funktioniert. Manche Kleinigkeiten sind allerdings durchaus kritisch für die Funktionsweise des Gehirns, darum sind wir gezwungen, zwischen relevanten Details und bloßem „stochastischem Rauschen“ zu unterscheiden. Die chaotischen (zufälligen und unvorhersehbaren) Aspekte der Gehirnfunktion können wir mithilfe der mathematischen Werkzeuge der Komplexitäts- und Chaostheorie modellieren.¹⁶
- *Gehirnfunktionen sind emergent*.* Intelligenz ist eine emergente Eigenschaft der komplexen, chaotischen Gehirnaktivität – vergleichbar mit der intelligenten Architektur von Ameisen- und Termitenhügeln mit raffinierten Tunnel- und Belüftungssystemen: Kein Architekt koordiniert diese clevere Bauweise, sie entsteht emergent aus den unabsehbaren Interaktionen der Kolonimitglieder, die jeweils nach relativ einfachen Regeln handeln.
- *Das Gehirn ist nicht perfekt.* Komplexe adaptive Systeme treffen meist suboptimale Entscheidungen, das heißt, die emergente Intelligenz ist geringer als theoretisch, bei optimaler Anordnung aller Elemente, möglich. Die Entscheidungen müssen nur ausreichend gut sein – im Falle unserer Spezies bedeutete das, intelligent genug zu sein, um den Kampf um unsere ökologische Nische zu gewinnen (also beispielsweise andere Primaten mit weniger entwickelten kognitiven Fähigkeiten und opponierbaren Daumen auszutricksen).
- *Wir widersprechen uns selbst.* Das Gehirn sprüht vor Ideen und Denkansätzen, die nicht notwendig miteinander konsistent sind. Wir können durchaus widersprüchliche Ansichten vertreten. Diese interne Diversität ist oft von Vorteil – der Vergleich mit einer demokratischen Gesellschaft, die konstruktiv mit gegensätzlichen Ansichten umgeht, liegt nah.

- *Das Gehirn betreibt Evolution.* Das Gehirn lernt durch einen grundlegenden evolutionären Mechanismus: Aktivierungsmuster, die oft auftreten, also an vielen Entscheidungen und Erkennungsprozessen beteiligt sind, werden verstärkt und überleben. Das Gehirn von Neugeborenen enthält größtenteils zufällige Neuronenbindungen, von denen ein Teil in den ersten Lebensjahren ausrangiert wird.¹⁷
- *Muster sind entscheidend.* Bestimmte Ausgangsparameter der chaotischen, selbstorganisierenden Prozesse im Gehirn sind von entscheidender Bedeutung, während andere anfänglich innerhalb eines gewissen Rahmens zufällig sind. Das System organisiert sich und identifiziert allmählich Regelmäßigkeiten in den Umweltdaten. Diese Informationen finden sich nicht in einzelnen Knoten oder Verknüpfungen, sondern liegen als verteilte Aktivierungsmuster vor.
- *Das Gehirn ist holografisch.* Es gibt Parallelen zwischen den verteilten Informationen in einem Hologramm und der Weise, in der Informationen im Gehirn repräsentiert sind. Das gilt auch für selbstorganisierende Verfahren für computergestützte Mustererkennung, wie künstliche neuronale Netze, Markov-Modelle und genetische Algorithmen.¹⁸
- *Das Gehirn ist hochgradig verknüpft.* Das Gehirn ist ein elastisches System, weil sein neuronales Netz sehr eng geknüpft ist und Informationen auf vielen verschiedenen Wegen von einem Punkt zum anderen gelangen können – ähnlich wie im Internet, das mit wachsender Knotenzahl immer stabiler wurde: Es bricht nicht zusammen, wenn einzelne Knoten oder auch ganze Hubs ausfallen. Ebenso funktioniert das Gehirn auch noch nach dem Verlust von Nervenzellen.
- *Das Gehirn ist in Areale unterteilt.* Die Verknüpfungen innerhalb eines Areals sind selbstorganisierend und anfänglich weitgehend zufällig. Fest steht jedoch die übergeordnete Einteilung in mehrere Hundert Areale mit festgelegten Aufgaben sowie die Verknüpfungsmuster zwischen diesen Bereichen.
- *Der Aufbau eines Gehirnareals ist einfacher als der eines Neurons.* Modelle sind auf höherer Ebene oft einfacher. Um einen Transistor zu modellieren, brauchen wir komplexe Gleichungen und Detailwissen in Halbleiterphysik. Eine Schaltung, die mithilfe

Hunderter Transistoren zwei Zahlen multipliziert, lässt sich dagegen sehr einfach, mit wenigen Formeln beschreiben. Ein Modell für einen ganzen Computer – Befehlssatz und Registerbeschreibung – besteht in einer Handvoll Seiten mit Text und mathematischen Funktionen.

Elementare Computersoftware – Betriebssystem, Compiler, Assembler – ist relativ komplex. Das Konzept für eine bestimmte Anwendung – beispielsweise Spracherkennung durch Markovmodelle – lässt sich dagegen oft in wenigen Seiten beschreiben. Darin kommt Halbleiterphysik natürlich nicht vor. Ähnliches gilt für das Gehirn: Eine bestimmte Neuronenanordnung, die ein bestimmtes visuelles Muster (zum Beispiel ein Gesicht) erkennt oder als Bandfilter für bestimmte Tonfrequenzen dient, lässt sich sehr viel einfacher beschreiben als die den neuronalen Mechanismen zugrunde liegenden physikalischen und chemischen Eigenschaften von Neurotransmittern und die synaptischen und dendritischen Variablen. Auch diese Details müssen wir genau unter die Lupe nehmen, bevor wir uns auf die nächste Ebene (Modellierung des Gehirns) begeben, doch viel davon kann vereinfacht werden, sobald die genaue Arbeitsweise des Gehirns verstanden ist.

Das eigene Denken verstehen

Die Beschleunigung der Neuroforschung

Das Voranschreiten der Neurowissenschaften beschleunigt sich. Wir erreichen nun die Biegung der Kurve: eine Periode raschen, exponentiellen Wachstums steht bevor. Die Geschichte unserer Bestrebungen auf dem Gebiet der Gehirnforschung reicht jedoch weit zurück. Unsere Spezies zeichnet sich durch die einzigartige Fähigkeit aus, über ihr eigenes Denken zu reflektieren und Erklärungen dafür zu suchen. Frühe Modelle des menschlichen Geistes basierten zwangsläufig auf der Beobachtung des äußeren Verhaltens. (Schon vor 2.350 Jahren

schrieb Aristoteles über die menschliche Fähigkeit, Ideen zu assoziieren).¹⁹

Zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts war die Technik reif, um physikalische Prozesse *innerhalb* des Gehirns zu untersuchen. Ein Durchbruch war die Messung der elektrischen Aktivität von Nervenzellen durch E. D. Adrian: Erstmals wurde offenbar, dass im Gehirn elektrische Prozesse stattfinden.²⁰ Adrian schrieb: „Im Rahmen von Experimenten an der Netzhaut einer Kröte hatte ich Elektroden am Sehnerv angebracht. Der Raum war fast dunkel und ich war überrascht, als ich wiederholt Geräusche aus dem an den Verstärker angeschlossenen Lautsprecher vernahm, welche auf beträchtliche elektrische Aktivität hindeuteten. Erst als ich einen Zusammenhang zwischen den Geräuschen und meinem eigenen Herumgehen im Raum bemerkte, wurde mir klar, dass ich mich im Sichtfeld der Kröte befand, und dass sie mit den Signalen auf meine Bewegungen reagierte.“

Das Hauptergebnis von Adrians Experiment ist noch heute ein Grundpfeiler der Neuroforschung: Die Frequenz der Nervenimpulse ist proportional zur Intensität des Sinneseindrucks. Je stärker beispielsweise ein Lichtreiz, desto höher die Frequenz der neuronalen Reaktion der Netzhaut. Einer von Adrians Studenten namens Horace Barlow machte eine weitere einflussreiche Entdeckung: Für manche Neuronen gibt es „trigger features“*. Barlow stellte fest, dass die Aktivität bestimmter Neuronen in der Netzhaut von Fröschen und Kaninchen durch den „Anblick“ bestimmter Merkmale ausgelöst wird – dass also einzelne Neuronen auf bestimmte Formen, Richtungen oder Geschwindigkeiten reagieren. Tatsächlich verläuft optische Wahrnehmung über mehrere Stadien, wobei in jeder weiteren Neuronenschicht zunehmend komplexe Bildmerkmale erkannt werden.

Ab 1939 entwickelte sich ein Verständnis der Funktionsweise von Neuronen: Die anliegende Eingangsspannung summiert sich auf, und sobald ein bestimmter Schwellenwert überschritten wird, steigt die Leitfähigkeit der Zellmembran schlagartig an, wodurch die Spannung entlang des Axons (welches wiederum über Synapsen mit anderen Neuronen verbunden ist) erhöht wird. A. L. Hodgkin und A. F. Huxley

bezeichneten diesen Prozess als „Aktionspotenzial“ des Axons.²¹ 1952 gelang ihnen die experimentelle Messung eines Aktionspotenzials an einem Tintenfischaxon.²² (Tintenfische haben besonders große und leicht zugängliche Nervenbahnen).

Darauf aufbauend entwickelten W. S. McCulloch und W. Pitts 1943 ein vereinfachtes Modell, welches über das nächste halbe Jahrhundert die Grundlage für künstliche (am Computer simulierte) neuronale Netze bilden sollte. Hodgkin und Huxley sorgten 1952 für den letzten Schliff des Konzepts. Zwar wissen wir heute, dass Nervenzellen deutlich komplexer aufgebaut sind, doch die Grundprinzipien dieser frühen Modelle sind nach wie vor gültig.

Das Grundmodell für neuronale Netze besteht aus Verbindungsgewichten (die „Synapsenstärken“) und einer nichtlinearen Aktivierungsfunktion (mit einem bestimmten Schwellenwert) für jede Nervenzelle. Wenn die gewichtete Summe der Aktivierung an den eingehenden Synapsen eines Neurons zunimmt, bleibt die Eigenaktivität des Neurons zunächst gering – solange bis eine kritische Schwelle erreicht ist. Dann nimmt die Aktivität schlagartig zu, das Axon beginnt zu feuern und gibt die Aktivierung über seine ausgehenden Synapsen weiter. Verschiedene Neuronen haben dabei unterschiedliche Aktivierungsschwellen.

Obschon die Forschung gezeigt hat, dass biologische Vorgänge in Wirklichkeit komplexer sind, finden solche Modelle bis heute Anwendung. Sie ermöglichten eine Flut von Arbeiten mit und über künstliche neuronale Netze. Diese Entwicklung wird als „Konnektionismus“ bezeichnet und ist wohl das erste selbstorganisierende Paradigma der Berechnungstechnik.

Ein wichtiger Faktor selbstlernender Systeme ist Nichtlinearität: Das Ergebnis ist mehr als eine gewichtete Summe der Eingabevariablen. In den klassischen Modellen besteht diese Nichtlinearität in der Aktivierungsfunktion der Nervenzelle.²³ (Eine entsprechende Formel lässt sich recht unkompliziert implementieren).²⁴ Etwa um dieselbe Zeit kam Alan Turing zu dem Ergebnis, dass Berechnung ganz allgemein

Nichtlinearität erfordert. Ein System, das nur multipliziert und addiert, ist für universelle Berechnungen unzulänglich.

Biologische Neuronen sind in vielerlei Hinsicht nichtlinear, angefangen bei der elektrochemischen Synapsenaktivität bis hin zur Morphologie der Dendriten. Dadurch ist ein einziges biologisches Neuron zu allerhand Berechnungen in der Lage, etwa zum Addieren, Subtrahieren, Dividieren, Mitteln, Filtern und Normalisieren von Signalen.

Multiplikation spielt eine besondere Rolle, denn sie ermöglicht die Modulation des Verhaltens eines Neuronenverbandes durch die Aktivität anderer Neuronen. Elektrophysiologische Experimente bei Affen deuten beispielsweise darauf hin, dass die Signalfrequenz von Neuronen im visuellen Kortex steigt oder sinkt, je nachdem auf welchen Bildausschnitt sich das Versuchstier konzentriert.²⁵ FMRI-Messungen bei Menschen zeigen ähnliche Effekte im für Bewegungserkennung zuständigen Kortexareal V5.²⁶

Ein wichtiger Durchbruch auf dem Feld der künstlichen neuronalen Netze war die 1949 von Donald Hebb formulierte „Hebbsche Lernregel“: Eine Synapse (oder eine Gruppe von Synapsen) wird stärker, je öfter sie aktiviert wird. Diese einfache Konditionierung des Netzes erzeugt auf Dauer einen Lerneffekt. Vor allem in den 1950er und 1960ern wurden viele Simulationsexperimente nach diesem Prinzip durchgeführt.

Mit der Veröffentlichung von *Perceptrons* von Marvin Minsky und Seymour Papert (MIT) erlitt der Konnektionismus einen Rückschlag.²⁷ Das Buch enthielt den Beweis, dass die gebräuchlichste (und einfachste) Art von neuronalen Netzen (das „Perzeptron“ nach Frank Rosenblatt) nicht in der Lage ist, zu entscheiden, ob eine Grafik zusammenhängend ist (also gezeichnet werden kann, ohne abzusetzen) oder nicht.²⁸ Für ein

Wiederaufleben sorgte jedoch 1980 ein neues Lernverfahren namens „Backpropagation“: Beim Training des Netzes werden nach jeder Entscheidung alle Synapsengewichte angepasst, sodass das Netz „lernt“ eine korrektere Antwort auf den jeweiligen Input zu produzieren.

Backpropagation ist kein stimmiges Modell für Lernprozesse biologischer neuronaler Netze, da diese über keine vergleichbaren

Rückkanäle verfügen, die den Erfolg eines Berechnungsprozesses an die beteiligten Synapsen kommunizieren könnten. Auf Computern haben sich Backpropagation-Netze jedoch als äußerst wertvoll für alle möglichen Arten von Mustererkennung erwiesen.

Weniger bekannt ist Hebb's zweite Hypothese, dass Neuronen schleifenartig (eventuell über andere Neuronen) rückgekoppelt sind, wodurch ein „Echo“ entsteht: Die Neuronen innerhalb der Schleife aktivieren sich immer wieder gegenseitig. Hebb vermutete darin die Ursache für Kurzzeit-Erinnerungen und beschreibt den Übergang ins Langzeitgedächtnis folgendermaßen: „Wir wollen annehmen, dass das Andauern oder Wiederholen einer solchen echoartigen Aktivität bleibende zelluläre Veränderungen hervorruft, die besagte Aktivität stabilisieren. Präzise ausgedrückt lautet die Annahme: Wenn ein Axon der Zelle A sich nah genug an Zelle B befindet, um diese zu erregen, und wiederholt oder dauerhaft an deren Aktivierung beteiligt ist, so kommt es in einer der Zellen oder in beiden Zellen zu Wachstumsprozessen oder metabolischen Veränderungen, welche die Effizienz der Zelle A als Auslöser der Aktivität von Zelle B erhöhen.“

Diese Hypothese ist weniger etabliert als die Hebb'sche Lernregel, doch mittlerweile gibt es entsprechende biologische Entdeckungen: beispielsweise kann man bei bestimmten visuellen Reizen ein oszillierendes Wechselspiel zwischen excitatorischen Neuronen (die eine Synapse stimulieren) und inhibitorischen Neuronen (die eine Synapse hemmen) beobachten.²⁹ Forscher des MIT und der Bell Labs von Lucent Technologies haben mit Transistoren Schaltungen der Großhirnrinde nachgebaut – ihr Chip simuliert das Zusammenspiel von sechzehn excitatorischen und einem inhibitorischen Neuron.³⁰

Diese frühen Modelle von Neuronen und neuronaler Datenverarbeitung mögen stark vereinfacht und in mancher Hinsicht nicht akkurat sein, dennoch ist ihre Entwicklung angesichts der zeitbedingten lückenhaften Daten und fehlenden technischen Möglichkeiten eine bemerkenswerte Leistung.

Ein Blick ins Gehirn

Wir konnten Abweichungen und Rauschen unserer Instrumente so weit reduzieren, dass wir in der Lage sind, kleinste Molekülbewegungen zu beobachten, über Distanzen, kleiner als der Durchmesser der Teilchen selbst. [...] [S]olcherlei Experimente waren vor 15 Jahren noch Wunschträume.

STEVEN BLOCK, PROFESSOR FÜR BIOWISSENSCHAFTEN UND ANGEWANDTE PHYSIK, STANFORD UNIVERSITY

Stellen Sie sich vor, wir wollten ohne irgendwelche Vorkenntnisse (im „Blackboxverfahren“) das Funktionsprinzip eines Computers rekonstruieren. Als Erstes würden wir vielleicht Magnetsensoren rund um das Gerät anbringen. Während eines Datenbankupdates würden wir erhöhte Aktivität eines gewissen Mikrochips sowie der Festplatte verzeichnen. (Eine Möglichkeit, Computern ein wenig über die Schulter zu schauen, war immer schon das Rumoren der Festplatte).

Wir kämen zu der Ansicht, dass die Festplatte irgendwas mit dem Langzeitgedächtnis des Versuchsobjektes zu tun hat, und dass besagter Mikrochip an der Verarbeitung der zu speichernden Daten beteiligt ist. Wir wüssten also, wann und wo die Operationen stattfinden, aber reichlich wenig darüber, wie.

Wenn die Register (temporäre Speicherpositionen) des Computers mit den Gehäuselämpchen verbunden wären (wie bei frühen Computern), würden sich die schnellen Änderungen der Registerinhalte während der Verarbeitung von Daten und die relativ langsamen Änderungen während der Übertragung in einem unterschiedlich starken Flackern der Kontrollleuchten niederschlagen. Auch diesen Zusammenhang würden wir bei unserer äußeren Betrachtung wohl bald erkennen. All diese Beobachtungen sind zutreffend, kratzen jedoch nur an der Oberfläche und liefern keinerlei Informationen über die tatsächliche Kodierung und Transformation der Daten.

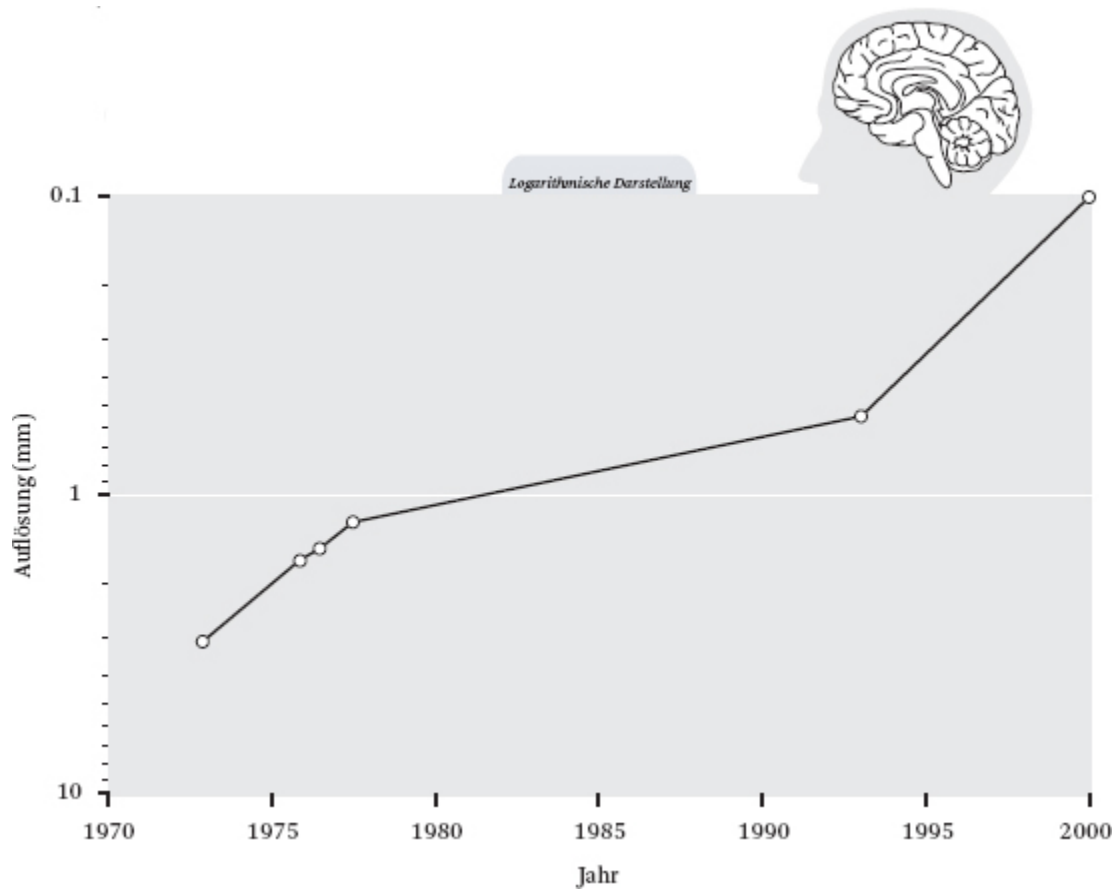
Dieses Gedankenexperiment entspricht ungefähr unseren bisherigen Versuchen, das Gehirn zu erforschen und zu modellieren. Moderne bildgebende Verfahren der Gehirnforschung (fMRI, MEG und andere Methoden; siehe unten) lassen lediglich Vermutungen über die elementaren

Mechanismen zu. Sie liefern wertvolle Daten, ihre räumliche und zeitliche Auflösung ist jedoch zu grob für ein Reverse Engineering der subtileren Eigenschaften des Gehirns.

Neue bildgebende Verfahren. Stellen wir uns nun vor, wir könnten in oben beschriebenem Szenario gezielt Sensoren in den Computerschaltkreisen platzieren, die mit hoher Frequenz präzise Messungen der übertragenen Signale vornehmen. Auf diese Weise könnten wir die Informationsverarbeitung in Echtzeit verfolgen und die Funktionsweise der Computerschaltungen exakt rekonstruieren – und tatsächlich gehen Elektroingenieure auch genau so vor, um Fehler in Schaltkreisen zu finden oder den Aufbau (etwa eines Konkurrenzproduktes) zu rekonstruieren: Sie platzieren Sensoren auf den logischen Schaltungen, um den Signalverlauf sichtbar zu machen.

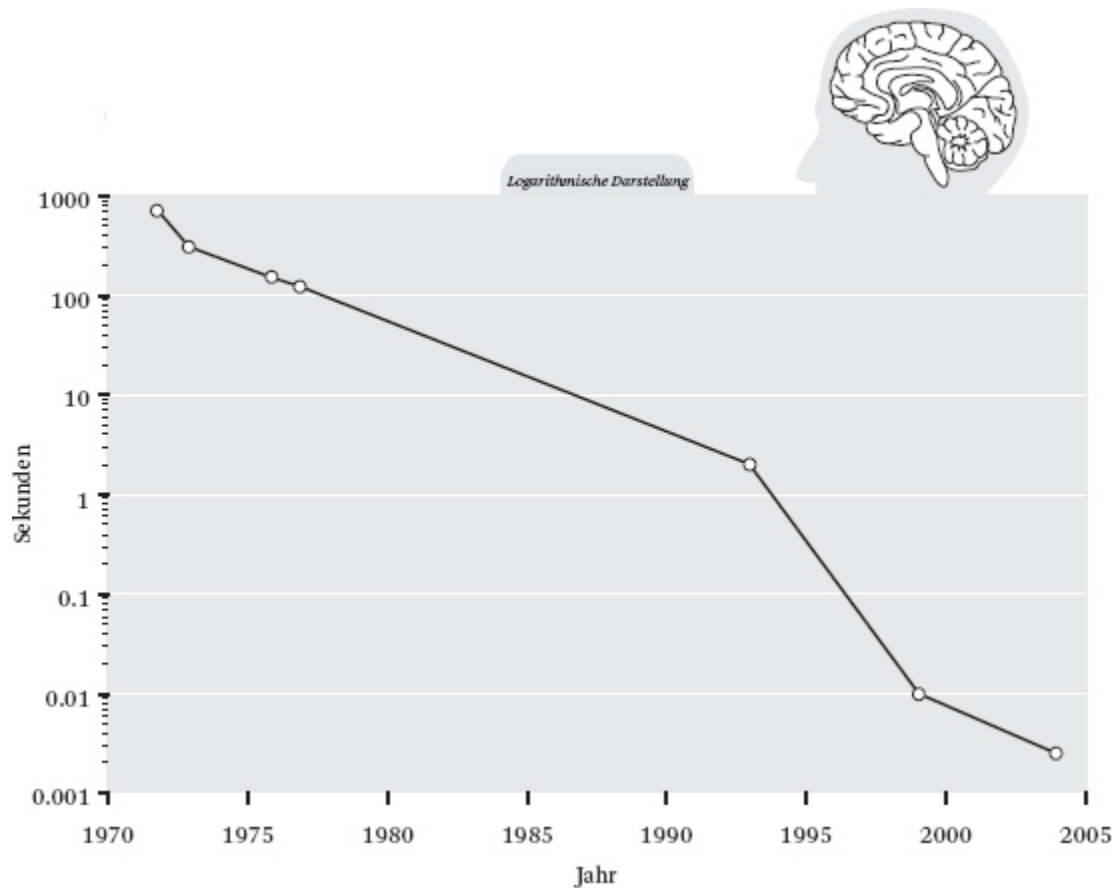
Bisher hatte die Gehirnforschung keine vergleichbare Sensortechnik, doch das wird sich bald ändern. Unsere Mittel, um einen Einblick ins Gehirn zu erlangen, verbessern sich exponentiell: Die Auflösung (per Volumen) nichtinvasiver bildgebender Verfahren verdoppelt sich etwa alle zwölf Monate.³¹

Auflösung nichtinvasiver Gehirnschans



Vergleichbare Verbesserungen sehen wir bei der Rekonstruktionszeit von Gehirnschans:

Bildrekonstruktionszeit für Gehirnschans (in Sekunden)



Das am weitesten verbreitete Verfahren für Gehirnaufnahmen ist fMRI. Dieses hat mit ein bis drei Millimetern eine recht gute räumliche Auflösung (immer noch zu gering, um einzelne Neuronen abzubilden), aber eine schlechte zeitliche Auflösung von mehreren Sekunden. Neueste Generationen der fMRI-Technik haben eine Auflösung von einer Sekunde – beziehungsweise einer Zehntelsekunde für Querschnittsaufnahmen.

Die ebenfalls verbreitete MEG-Technik misst schwache Magnetfelder auf der Schädeloberfläche, die hauptsächlich von Pyramidenzellen (große Nervenzellen) in der Hirnrinde stammen. MEG ist sehr schnell (mit einer zeitlichen Auflösung von einer Millisekunde), aber dafür ungenau (mit räumlicher Auflösung von etwa einem Zentimeter).

Fritz Sommer (Redwood Neuroscience Institute) arbeitet an Verfahren, die fMRI und MEG kombinieren, um präzisere Messungen zu ermöglichen.

Ebenfalls in Aussicht sind fMRI-Techniken, die einzelne, nur den Bruchteil eines Millimeters große Schichten und Säulen des Nervengewebes abbilden können – und das Ganze im Bereich von wenigen zehn Millisekunden.³²

fMRI und die sogenannte Positronen-Emissions-Tomografie (PET) ermitteln die neuronale Aktivität auf indirektem Wege anhand der Durchblutung: PET misst den rCBF*, fMRI misst den lokalen Blutsauerstoffgehalt.³³ Es gibt einige Kontroversen bezüglich des Zusammenhangs der Durchblutung und der neuronalen Aktivität von Gehirnarealen – der Konsens ist bisher, dass erhöhte Durchblutung auf Synapsenaktivität hindeutet, nicht jedoch auf Erregung von Nervenzellen. Der Zusammenhang von Durchblutung und neuronaler Aktivität wurde bereits Ende des neunzehnten Jahrhunderts entdeckt, ist jedoch – zum Nachteil des fMRI-Verfahrens – kein direkter, sondern von diversen Stoffwechselvorgängen abhängig.³⁴

Dennoch gelten PET und fMRI als zuverlässige Messmethoden für Zustandsänderungen im Gehirn. Dabei kommt das „Subtraktionsverfahren“ zum Einsatz, das die relative Aktivität von Gehirnbereichen während bestimmter Tätigkeiten ermittelt.³⁵ Dazu werden zwei Aufnahmen gemacht, eine von der untätigen Versuchsperson, und die andere, während die Person eine bestimmte Aufgabe erfüllt. Anschließend wird die erste Aufnahme von der zweiten subtrahiert – die Differenz zeigt an, wie sich die Hirnaktivität verändert hat.

„Optical imaging“ ist eine invasive Technik mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung: Man entfernt einen Teil des Schädels, präpariert das Gehirngewebe mit einer Farbe, die bei neuronaler Aktivität fluoresziert, und erstellt Aufnahmen per Digitalkamera. Da dies ein chirurgischer Eingriff ist, kommt das Verfahren hauptsächlich bei Tierversuchen, insbesondere bei Mäusen, zum Einsatz.

Eine Möglichkeit, die Aufgabenverteilung der verschiedenen Gehirnareale auszuloten, ist transkranielle Magnetstimulation (TMS). Dabei wird eine Magnetspule an den Schädel angelegt, welche das Gehirn starken Magnetfeldern aussetzt; dadurch werden Gehirnareale gezielt stimuliert bzw. „virtuelle Läsionen“ erzeugt (also Bereiche temporär deaktiviert). Die dabei auftretende Verbesserung oder Verschlechterung bestimmter

Fähigkeiten der Probanden gibt dann Aufschluss über die Rolle der beeinflussten Areale.³⁶ In bestimmten Gehirnregionen kann TMS sogar spirituelle Erfahrungen verursachen.³⁷ Wie Neurowissenschaftler Allan Snyder berichtet, verfügten 40 Prozent seiner Versuchspersonen unter Einfluss von TMS über verbesserte – mitunter verblüffende – Fähigkeiten in bestimmten Bereichen, beispielsweise beim Zeichnen.³⁸

Wenn wir keine Rücksicht auf Unversehrtheit des Gehirns nehmen müssen, ist eine bedeutend höhere räumliche Auflösung möglich. Auch ohne Eingriff können wir bereits Schnappschüsse von Gehirnzuständen machen, aber Geschwindigkeit und Bandbreite reichen noch nicht aus, um alle Verknüpfungen exakt zu erfassen. Doch aufgrund des Gesetzes vom steigenden Ertragszuwachs verbessern sich auch die bildgebenden Verfahren der Gehirnforschung exponentiell.

Andreas Nowatzky (Carnegie Mellon University) sezirt Körper und Nervensystem von Mäusen mit einer Genauigkeit unter zweihundert Nanometern, was der für ein komplettes Reverse Engineering benötigten Auflösung nahe kommt. Der ebenfalls destruktive „Brain Tissue Scanner“ des Brain Networks Laboratory der Texas A&M University kann innerhalb von einem Monat ein komplettes Mäusegehirn auf 250 Nanometer genau abbilden – das Gehirn wird dazu in Scheiben geschnitten.³⁹

Höhere Auflösung. Derzeit befinden sich viele neue bildgebende Verfahren mit deutlich verbesserter räumlicher und zeitlicher Auflösung in Entwicklung. Mithilfe dieser neuen Generationen von Scannern und Sensoren können wir neue Modelle von noch nie da gewesener Detailschärfe erstellen. Im Folgenden möchte ich einige Kostproben dieser neuen Techniken vorstellen.

Das Neuroengineering Research Laboratory der University of Pennsylvania entwickelt unter der Führung von Leif H. Finkel ein sensationelles Kamerasystem, das einmal in der Lage sein soll, in Abständen von einer Millisekunde Bilder zu schießen, auf der einzelne Nervenzellen erkennbar sind – das wäre gut genug, um das Feuern der einzelnen Neuronen zu beobachten.⁴⁰

Erste Prototypen können hundert Zellen auf einmal ablichten, bei einem Linsenabstand von bis zu zehn Mikrometern. Zukünftige Modelle sollen bis zu tausend Zellen erfassen, mit Abständen bis zu 150 Mikrometern und in Zeitabständen unter einer Millisekunde. Die Aufnahmen können in vivo (am lebendigen Gehirn) bei geöffneter Schädeldecke gemacht werden, während das Versuchstier eine bestimmte Aufgabe erledigt. Das Nervengewebe wird dazu mit einer Flüssigkeit behandelt, die spannungsabhängig fluoresziert. Aufnahmen erfolgen bevor und nachdem das Tier eine bestimmte Aufgabe gelernt hat. Dieses System vereint die Zeitauflösung von MEG (eine Millisekunde) und die Fähigkeit, einzelne Nervenzellen und -bahnen abzubilden.

Eine Möglichkeit, auf nichtinvasive Weise mit großer räumlicher und zeitlicher Präzision die Aktivität von Neuronen oder auch nur bestimmter Teile eines Neurons zu beobachten, ist „Zweiphotonenmikroskopie“⁴¹. Messungen erfolgen dabei an einem ganz bestimmten, dreidimensional genau definierten Punkt, was eine sehr hohe Auflösung ermöglicht. Durch eine extrem kurze Laserbestrahlung – für eine millionstel milliardstel (10^{-15}) Sekunde – wird der intrazelluläre Kalziumgehalt am Messpunkt ermittelt, woraus auf die Aktivität einzelner Synapsen geschlossen werden kann.⁴² Das Verfahren zerstört leider das Gewebe, liefert aber extrem hochaufgelöste Aufnahmen von Dendriten und Synapsen in Aktion.

Der Physiker Eric Mazur und seine Kollegen (Harvard University) setzten diese Methode für intrazelluläre Chirurgie ein. Sie demonstrierten, dass es möglich ist, Neuronenbindungen zu trennen oder einzelne Mitochondrien (zelluläre Energiegeneratoren) zu zerstören, ohne andere Zellorganellen zu beeinträchtigen. Mazurs Kollege Donald Ingber: „Wir erzeugen die Hitze der Sonne, aber nur eine trillionstel Sekunde lang und auf sehr engem Raum“.

Eine weitere Messtechnik sind „Multielektrodenarrays“, wobei ein Elektrodenraster die Aktivität vieler Neuronen gleichzeitig misst – mit sehr hoher zeitlicher Auflösung (unter einer Millisekunde).⁴³

Sogenannte Frequenzverdopplung („second harmonic generation“, SHG) ermöglicht nichtinvasive mikroskopische Untersuchung von „Zellen in Aktion“, erklärt der leitende Entwickler Daniel Dombeck (Cornell

University). Optische Kohärenztomografie („optical coherence imaging“, OCI) erzeugt mithilfe von kohärentem Licht (phasengleichen Lichtwellen) holografische, dreidimensionale Abbildungen von Zellverbänden.

Scannen mit Nanobots. Nichtinvasive Methoden, die das Gehirn von außen abbilden, werden immer besser, doch der effektivste Ansatz zur genauen Abbildung neuronaler Details ist die Innenaufnahme. In den 2020ern wird Nanotechnik auf dem Vormarsch sein, und das Gehirn ist einer ihrer spannendsten Einsatzorte. Wie zuvor beschrieben, sind Nanobots Roboter von der Größe eines Blutkörperchens (sieben bis acht Mikrometer) oder noch kleiner.⁴⁴ Schwärme dieser kleinen Maschinen könnten die Gehirnkapillaren durchströmen und das Nervensystem aus nächster Nähe ganz genau abtasten. Sie könnten über schnelle Funkverbindungen kommunizieren – miteinander und mit Computern, welche die Messdaten aufnehmen. (Nanobots und Computer bilden dann ein gemeinsames Drahtlosnetz).⁴⁵

Eines der größten Hindernisse dabei ist die Blut-Hirn-Schranke (BHS). Ende des neunzehnten Jahrhunderts injizierten Wissenschaftler blaue Farbe in den Blutkreislauf von Tieren und stellten fest, dass alle Organe blau wurden – mit Ausnahme von Gehirn und Rückenmark. Darum stellten sie die (zutreffende) Hypothese auf, dass eine Barriere existiert, die das Nervensystem vor potenziell schädlichen Substanzen schützt, einschließlich Bakterien, Hormonen, neurotransmitterartigen Chemikalien und anderen Giften. Lediglich Sauerstoff, Glukose und eine sehr enge Auswahl anderer kleiner Moleküle gelangen aus den Blutgefäßen ins Gehirn.

Zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts ergaben Autopsien, dass Blutgefäße im Nervengewebe deutlich dichter mit Endothelzellen ausgekleidet sind als Blutgefäße in anderen Organen. Jüngere Untersuchungen zeigen, dass die BHS einem Sicherheitssystem mit Schlüsseln und Passwörtern gleicht. Beispielsweise entdeckte man zwei Proteine namens Zonulin und Zot, die mit Rezeptoren im Gehirn reagieren und die BHS an bestimmten Stellen durchlässig machen können. Diese Proteine ermöglichen durch einen ähnlichen Mechanismus im Dünndarm die Verdauung von Glukose und anderen Nährstoffen.

Bei der Entwicklung von Nanobots, die mit dem Gehirn interagieren sollen, muss die BHS berücksichtigt werden. Ich beschreibe hier einige denkbare Strategien, die mit zukünftiger Technik realisierbar sind. Zweifellos werden im nächsten Vierteljahrhundert noch weitere dazukommen.

- Wenn Nanobots klein genug sind, können sie durch die BHS hindurch schlüpfen. Das ist der naheliegendste, aber zugleich am wenigsten praktikable Ansatz. Nanobots müssten dazu einen Durchmesser von weniger als zwanzig Nanometern haben, was der Größe von gerade mal hundert Kohlenstoffatomen entspricht. Damit wäre ihre Funktionalität stark eingeschränkt.
- Eine Zwischenlösung wäre, die Nanobots in den Blutgefäßen zu belassen und mit einem Roboterarm auszustatten, der durch die BHS hindurch in die extrazelluläre Flüssigkeit in Nähe der Nervenzellen reicht. Der Nanobot selbst bliebe groß genug, um die nötigen Berechnungs- und Navigationsfähigkeiten zu besitzen. Arbeiten von Rob Freitas und anderen zeigen, dass ein solcher Roboterarm durchaus unter zwanzig Nanometern realisierbar ist.
- Ein anderer Ansatz wäre, die Nanobots mit nichtinvasiver Messtechnik auszustatten. Das von Finkel und seinen Kollegen entwickelte System liefert beispielsweise hohe Auflösungen (ausreichend für einzelne Neuronenbindungen) über eine Distanz von 150 Mikrometern – ein Vielfaches von dem, was wir bräuchten. Natürlich müsste das Kamerasystem (im Vergleich zu heutigen Modellen) noch gehörig eingeschrumpft werden; die CCD-Sensoren, auf denen es beruht, lassen sich allerdings tatsächlich potenziell stark verkleinern.
- Nanobots könnten auch gebündelte Signale durch Gewebe senden, die von anderen Nanobots auf der anderen Seite aufgefangen werden. Von der Signalabweichung könnte auf die Topologie des Gewebes geschlossen werden.
- Robert Freitas schlug vor, dass Nanobots die BHS im wahrsten Sinne des Wortes durchbrechen könnten, indem sie ein Loch hineinschlagen, hindurchschlüpfen, und den Schaden reparieren. Aufgrund ihrer diamantartigen Kohlenstoffstruktur sind Nanobots deutlich stärker als biologisches Gewebe. Freitas schreibt: „Ein

Nanoroboter muss auf seinem Weg eine Mindestanzahl von adhäsiven Zellverbindungen zerstören, um zwischen den Zellen eines Zellverbandes hindurchzugelangen. Um den Gewebeschaden minimal zu halten, muss der Nanoroboter die adhäsiven Verbindungen hinter sich wieder versiegeln, so ähnlich wie ein Maulwurf, der sich durch die Erde wühlt.“⁴⁶

- Ein weiterer Ansatz stammt aus der Krebsforschung: Auch in diesem Feld ist man sehr interessiert an Möglichkeiten, die BHS selektiv zu umgehen, und zwar um krebshemmende Substanzen zu Tumoren durchzuschleusen. Untersuchungen zeigen, dass eine Reihe von Faktoren die BHS öffnen können: Hypertonie (Bluthochdruck), hohe Konzentrationen bestimmter Substanzen, Mikrowellen und andere Strahlungen, Infektionen, Entzündungen und, wie bereits erwähnt, bestimmte Proteine. Spezielle Prozesse sorgen außerdem für den Transport benötigter Substanzen, unter anderem von Glukose. Im Übrigen lässt Mannitol (ein Zuckeralkohol) temporär die Endothelzellen schrumpfen und macht dadurch die BHS durchlässig. Mehrere Forschungsgruppen arbeiten an Wirkstoffen, die diese Mechanismen ausnutzen, um die BHS zu umgehen.⁴⁷ Ihre Bemühungen zielen zwar auf Krebstherapie, doch ähnliche Methoden könnten auch Nanobots die Tür öffnen, um das Gehirn zu scannen und unsere mentalen Fähigkeiten zu verbessern.
- Wir könnten den Blutkreislauf und die BHS komplett umgehen, indem wir Nanobots direkt an den Einsatzort im Gehirn injizieren. Wie zuvor erwähnt, wandern neu entstandene Neuronen von den Ventrikeln an andere Orte im Gehirn – Nanobots könnten hier einfach mitreisen.
- Rob Freitas hat mehrere Techniken beschrieben, mit denen Nanobots sensorische Signale überwachen könnten, was eine wichtige Rolle spielt, sowohl für das Reverse Engineering der Eingabedaten des Gehirns (also der menschlichen Wahrnehmung), als auch für das Erzeugen einer vollständigen virtuellen Realität aus dem Inneren des Nervensystems heraus.⁴⁸

* Um auditorische Signale zu messen und zu überwachen, schlägt Freitas „mobile Nanomaschinen“ vor, „[die] über die Blutgefäße des Ohrs die Hörschnecke erreichen und sich an

den Nervenbahnen des Spiralganglions sowie den vom Cortischen Organ ausgehenden Nerven positionieren, um deren neuronale Aktivität zu überwachen. Diese Kontrollposten können dann den gesamten Datenverkehr der Hörnerven messen, aufzeichnen und an andere, im Kommunikationsnetz befindliche Nanomaschinen übertragen.“

- * Was den „Gravitations-, Rotations- und Beschleunigungssinn“ des Körpers betrifft, denkt Freitas an „Nano-Überwachungseinheiten an den afferenten Nervenenden von Haarsinneszellen in den Bogengängen des Innenohrs“.
- * Hinsichtlich der „kinästhetischen Wahrnehmung [...] könnten Motoneuronen angezapft werden, um Bewegung und Position der Glieder, sowie spezifische Muskelaktivitäten zu überwachen und sogar zu steuern“.
- * „Olfaktorische und gustatorische Nervensignale können mit entsprechenden Nanosensoren abgehört werden“.
- * „Schmerzsignale können aufgefangen und nach Bedarf verändert werden – ebenso mechanische und temperaturbedingte Reize von [...] Rezeptoren in der Haut“.
- * Freitas erklärt, dass die Netzhaut von kleinen Blutgefäßen durchsetzt ist, welche „Zugang sowohl zu Fotorezeptoren (Stäbchen, Zapfen, Bipolarzellen und Ganglien) als auch zu den integrierenden Neuronen gewähren“. Der Sehnerv überträgt über einhundert Millionen Signale pro Sekunde, doch die Verarbeitung solcher Bandbreiten ist heute kein großes Problem mehr. Tomaso Poggio und andere haben darauf hingewiesen, dass wir noch nicht verstehen, wie die Signale des Sehnervs kodiert sind. Wir werden es deutlich einfacher haben, diese Signale zu interpretieren, sobald wir in der Lage sind, jede Nervenfaser einzeln zu überwachen.

Wie zuvor beschrieben durchlaufen die Nervensignale des Körpers mehrere Verarbeitungsebenen. Zum Schluss werden sie in zwei kleinen Organen tief in der Großhirnrinde zu einer kompakten, dynamischen

Weltdarstellung verdichtet. Für die Erzeugung von virtueller Realität macht es vielleicht mehr Sinn, direkt bei den verarbeiteten Signalen anzusetzen, als bei den körperlichen Sinneseindrücken.

Das Reverse Engineering der allgemeinen Arbeitsweise des Gehirns stellt weniger Ansprüche an Gehirnscans als die weiter unten beschriebenen „Uploads“ bestimmter Persönlichkeiten (siehe „Gehirn-Upload“ auf [Seite 199](#)). Für ein Reverse Engineering müssen wir lediglich die Verknüpfungsschemen der einzelnen Gehirnareale verstehen – wir müssen nicht jede einzelne Verbindung erfassen.

Wenn wir das Verknüpfungsmuster einer Hirnregion kennen, können wir dieses Wissen mit detaillierten Verhaltensmodellen der beteiligten Nervenzellenarten kombinieren. Ein Areal mag Milliarden von Neuronen enthalten, doch die Auswahl an Zellarten ist relativ überschaubar – und wir verzeichnen bereits bedeutende Erfolge bei der Erforschung der Mechanismen verschiedener Neuronen und Synapsentypen, sowohl in vitro (im Reagenzglas) als auch in vivo, beispielsweise durch Zweiphotonenmikroskopie.

Die in den oben beschriebenen Szenarien vorausgesetzten technischen Möglichkeiten existieren zumindest in Ansätzen bereits heute. Wir können bereits hochaufgelöste Aufnahmen von den Verbindungen in einem bestimmten Gehirnbereich erstellen, sofern sich der Scanner nahe genug am Nervengewebe befindet. Was Nanobots betrifft, gibt es bereits vier große Konferenzen, die sich mit der Entwicklung von Maschinen im Blutzellenformat für diagnostische und therapeutische Zwecke befassen.⁴⁹ In [Kapitel 2](#) haben wir Hochrechnungen für den Preisverfall von Berechnungstechnik gesehen, sowie für die schnelle Miniaturisierung und Effizienzzunahme von elektronischer und mechanischer Technik. Davon ausgehend können wir annehmen, dass die beschriebenen Verfahren in den 2020ern machbar sein werden – und sobald Gehirnscans durch Nanobots möglich sind, können wir mit dem Gehirn verfahren, wie Ingenieure mit Mikrochips: Wir können dann hochempfindliche und hochauflösende Sensoren (in Form von Nanobots) an Millionen oder gar Milliarden Stellen im Gehirn platzieren, um dieses mit atemberaubender Detailschärfe in Aktion zu beobachten.

Gehirnmodelle

Was aber ist, wenn diese Theorien wirklich zutreffen, und wir, wie durch ein Wunder, schrumpften und in das Gehirn eines – denkenden – Menschen gelangten. Wir würden sehen, wie all die Pumpen, Kolben, Zahnräder und Hebel arbeiteten, und wir könnten ihre Arbeitsweise – was die Mechanik anbelangt – vollständig beschreiben, wodurch wir auch die Denkprozesse des Gehirns vollständig beschreiben könnten. Doch in dieser Beschreibung würde das Denken mit keinem Wort erwähnt werden! Es wäre nichts weiter als eine Beschreibung von Pumpen, Kolben und Hebeln!

G. W. LEIBNIZ (1646–1716)

Wie artikulieren die [...] Felder ihre Grundlagen? Physiker sprechen von Photonen, Elektronen, Quarks, Wellenfunktionen, Relativität und Energieerhaltung. Astronomen sprechen von Planeten, Sternen, Galaxien, Rotverschiebung und Schwarzen Löchern. Thermodynamiker sprechen von Entropie, vom ersten und zweiten Hauptsatz und dem Carnot-Kreisprozess. Biologen sprechen von Phylogenie, Ontogenese, DNS und Enzymen. Jeder dieser Begriffe ist die Überschrift eines ganzen Kapitels! Die Grundlagen eines jeden Feldes ist eine verwobene Geschichte von der Struktur und dem Verhalten seiner Elemente.

PETER J. DENNING, EHEMALIGER PRÄSIDENT DER ASSOCIATION FOR COMPUTING MACHINERY, IN „GREAT PRINCIPLES OF COMPUTING“

Es ist wichtig, dass die Modellierung des Gehirns auf der richtigen Ebene stattfindet. Das gilt natürlich für alle wissenschaftlichen Modelle. Chemie basiert theoretisch auf Physik und kann vollständig physikalisch beschrieben werden – das wäre jedoch umständlich und unpraktikabel, weshalb die Chemie eigene Regeln und Modelle hat. Ebenso wäre es theoretisch möglich, aber alles andere als pragmatisch, die Thermodynamik auf Physik zu reduzieren. Sobald wir es mit mehr als einer Handvoll Teilchen zu tun haben – genug, um von einem Gas zu sprechen –, ist es kaum noch möglich, die Gleichungen für die Interaktionen der Teilchen zu lösen, während sich die Gesetze der Thermodynamik ganz wunderbar anwenden lassen. Die Interaktionen eines einzelnen Moleküls in einem Gas sind hoffnungslos komplex und praktisch unberechenbar. Das Gas an sich, als Summe von Billionen von Molekülen, hat dagegen viele berechenbare Eigenschaften.

Dementsprechend hat auch die Biologie trotz ihrer Verwurzelung in der Chemie eigene Modelle. Man muss zunächst die Grundlagen verstehen, um sich auf eine höhere Ebene zu begeben, doch häufig ist es unpraktisch, die

Zusammenhänge der höheren Ebene auf einer niedrigeren Ebene zu beschreiben. Beispielsweise können wir die genetische Beschaffenheit von Tieren verändern, ohne alle biochemischen Mechanismen der DNS zu kennen, geschweige denn die Wechselwirkungen der einzelnen Atome.

Häufig ist die niedrigere Ebene komplexer. Beispielsweise ist eine Inselzelle in der Bauchspeicheldrüse enorm komplex, was ihre biochemischen Funktionen betrifft (die sie größtenteils mit allen menschlichen Zellen gemein hat). Die Insulin- und Verdauungsregulation durch die Millionen von Zellen umfassende Bauchspeicheldrüse lässt sich dagegen sehr viel einfacher modellieren als eine einzelne Inselzelle.

Dasselbe gilt für die Verständnis- und Modellierungsebenen des Gehirns, von der Physik einer einzelnen Synapse bis zur Datenverarbeitung durch ganze Neuronenverbände. Mit Gehirnbereichen, für die wir ein gutes Modell gefunden haben, ergeht es uns ähnlich wie mit der Bauchspeicheldrüse. Die Modelle sind komplex, aber deutlich einfacher als mathematische Beschreibungen einzelner Zellen oder Synapsen. Wie wir gesehen haben, erfordern gute Modelle von Gehirnregionen auch deutlich weniger Rechenleistung, als theoretisch in den Synapsen und Zellen steckt.

Gilles Laurent (California Institute of Technology): „In den meisten Fällen ist es sehr schwer, von Informationen über die einzelnen Komponenten auf das kollektive Verhalten eines Systems zu schließen. [...] Neurowissenschaft ist [...] eine Wissenschaft von Systemen, für die lokale Erklärungsmodelle erster Ordnung nötig sind, aber nicht ausreichen.“ Die Impulse für das Voranschreiten des Reverse Engineering des Gehirns kommen darum sowohl von den hohen wie von den niedrigen Modellierungsebenen.

Bis vor Kurzem waren die Neurowissenschaften aufgrund ungenauer Messtechnik von allzu simplifizierenden Modellen bestimmt, was Zweifel aufkommen ließ, ob es unserer Intelligenz überhaupt inhärent möglich ist, sich selbst zu ergründen. Peter D. Kramer schreibt: „Wenn unser Verstand schlicht genug wäre, um von uns verstanden zu werden, so wären wir zu schlicht, um ihn zu verstehen.“⁵⁰ Zuvor habe ich Douglas Hofstadters Vergleich mit der Giraffe zitiert, deren Gehirn von unserem nicht allzu verschieden ist, die jedoch ganz bestimmt nicht in der Lage ist, ihr eigenes

Denken zu verstehen. Wir können jedoch bereits detaillierte Modelle auf verschiedenen Ebenen vorweisen: von den einzelnen Komponenten der Nervenzelle (Beispiel Synapse) bis zu großen Gehirnteilen (Beispiel Kleinhirn). Die bisherigen Erfolge zeigen, dass die mathematische Modellierung und Simulation des Gehirns anspruchsvoll, aber zu schaffen ist. Modelle haben eine lange Tradition in der Hirnforschung, doch seit Kurzem sind sie umfassend und detailliert genug, um die Beobachtungen von Gehirnexperimenten genau zu reproduzieren.

Subneuronale Modelle: Synapsen und Dornfortsätze

Aus einer Rede des Psychologen und Neurowissenschaftlers Joseph LeDoux (New York University) vor der Jahresversammlung der American Psychological Association im Jahre 2002:

Wenn unsere Erinnerungen unser Wesen formen, und Erinnerung eine Gehirnfunktion ist, dann sind Synapsen – die Schnittstellen, über die Neuronen miteinander kommunizieren, und die physikalischen Strukturen, in denen unsere Erinnerungen gespeichert sind – die elementaren Grundbausteine unseres Selbst. [...] Synapsen befinden sich ziemlich weit unten auf dem Totempfehl des Gehirnaufbaus, doch ich halte sie für ziemlich wichtig. [...] Das Selbst ist die Summe der einzelnen Teilsysteme des Gehirns, jedes davon mit seiner Art von Erinnerungen, plus die komplexen Interaktionen der Teilsysteme untereinander. Ohne synaptische Plastizität – die Fähigkeit von Synapsen, ihre Durchlässigkeit für Signale zwischen Neuronen anzupassen – wären die für das Lernen erforderlichen Veränderungen in diesen Systemen nicht möglich.⁵¹

Frühere Modelle betrachteten das Neuron als Grundeinheit der Informationsverarbeitung, doch subneuronale Komponenten rücken zunehmend ins Rampenlicht. Anthony J. Bell, ein Forscher im Bereich „Computational Neuroscience“^{*}:

Molekulare und biophysische Vorgänge bestimmen die Empfindlichkeit von Neuronen für eingehende Aktionspotenziale (also die synaptische Effizienz und die postsynaptische Erregung), die Anregbarkeit des Neurons zu eigenen Aktionspotenzialen, die Signalmuster, die es erzeugt, und die Wahrscheinlichkeit für das Entstehen neuer Synapsen, um nur vier der wichtigsten subneuronalen Einflüsse zu nennen. Zudem haben transneuronale Effekte, wie lokale elektrische Felder und Membrandiffusion von Stickoxid, direkten Einfluss auf die neuronale Aktivität sowie auf die Energieversorgung (Durchblutung) von Zellen, welche wiederum direkt mit der Aktivität korreliert. Diese Liste ließe sich beliebig fortführen. Ich denke, wenn man sich ernsthaft mit Neuromodulatoren, Ionenkanälen oder synaptischen Mechanismen beschäftigt, muss man, wenn man ehrlich ist, zugeben, dass die Neuronenebene

zwar als Beschreibungsebene, aber nicht als eigenständige Berechnungsebene infrage kommt.⁵²

Wirkliche Synapsen sind in der Tat weitaus komplexer als das klassische Modell nach McCulloch und Pitts. Die synaptische Erregungsleitung hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem von der Aktivität spannungsgesteuerter Ionenkanäle und von diversen Neurotransmittern und -modulatoren. In den letzten zwanzig Jahren gab es beträchtliche Fortschritte bei der mathematischen Beschreibung von Neuronen, Dendriten, Synapsen und Signalkaskaden (das Feuern von Neuronen). Kürzlich erstellten Peter Dayan und Larry Abbott eine Zusammenfassung aller bekannten nichtlinearen Differenzialgleichungen zur Beschreibung der Ergebnisse tausender Experimente.⁵³ Es gibt fundierte biophysische Modelle für Nervenzellkörper, Synapsen, rückkopplungsfreie neuronale Netze wie in der Netzhaut und den Sehnerven, und viele andere Arten von Neuronenverbänden.

Hebb lenkte als Erster das Augenmerk auf die Funktionsweise von Synapsen. Er ging dabei der Frage nach, wie das Kurzzeitgedächtnis (heute auch Arbeitsgedächtnis genannt) funktioniert. Der damit gemeinhin assoziierte Gehirnbereich ist der präfrontale Kortex, wobei fast alle untersuchten neuronalen Systeme über eine Art von Kurzzeit-Informationsspeicherung verfügen.

Hebb befasste sich hauptsächlich mit den synaptischen Veränderungen, welche die Signalfortleitung verstärken oder abschwächen, sowie mit seiner etwas kontroverseren Theorie von echoartiger Aktivität durch Neuronenschleifen.⁵⁴ Hebb vermutete auch, dass Zustandsänderungen des Somas (also des Nervenzellkörpers) zum Gedächtnis beitragen. Für alle drei Modelle gibt es experimentelle Indizien. Mit dem klassischen synaptischen Gedächtnis und der Theorie der Neuronenschleifen könnten Informationen nur mit einer gewissen Verzögerung abgerufen werden. Experimente in vivo zeigen jedoch, dass es zumindest in manchen Hirnregionen neuronale Antworten gibt, die zu schnell sind, um auf den Standard-Lernmodellen zu beruhen, und die somit auf lernabhängige Anpassungen im Soma hindeuten.⁵⁵

Eine andere Möglichkeit, die Hebb noch nicht erahnte, sind Veränderungen von Neuronenbindungen in Echtzeit. Es gibt Belege für sehr schnelles Wachstum von dendritischen Dornfortsätzen und neuen Synapsen, daher dürften auch solche Mechanismen eine Rolle spielen. Tatsächlich offenbaren Experimente viele Arten von Lernverhalten jenseits der Hebbschen Modelle. So gibt es Synapsen, die sich sehr schnell verändern, aber dann bei regelmäßiger Stimulation allmählich abschwächen, andere, die sich bei mangelnder Stimulation zurückbilden, und viele andere Varianten.⁵⁶

Heutige Modelle haben deutlich an Komplexität zugelegt, doch Hebb's Intuition war korrekt. Moderne Modelle beziehen neben der synaptischen Plastizität auch globale Regulationsprozesse mit ein. Synaptische Skalierung verhindert beispielsweise, dass das synaptische Potenzial auf Null absinkt (wodurch multiplikative Anpassung unmöglich würde) oder übermäßig groß wird und das Netz dominiert. Vergleichbare Regulationen finden sich auch bei in vitro kultivierten Netzen aus Neuronen des Neokortex, des Hippocampus und des Rückenmarks.⁵⁷ Andere Mechanismen sind von vielen Synapsen gleichzeitig abhängig, genauer gesagt vom relativen Timing ihrer Aktivierung und der Potenzialverteilung in der Synapsengruppe. Die Anwendung vergleichbarer Regeln auf simulierte Netze erhöhte deren Lernerfolg und Stabilität.

Die faszinierendste Neuentdeckung ist, dass die Topologie der Synapsen und der Verbindungen, die sie bilden, in kontinuierlicher Bewegung ist. Einen ersten Einblick in die rasche Veränderlichkeit der synaptischen Verknüpfungen ermöglichte ein neuartiges Scanverfahren mit einem genmanipulierten Versuchstier, dessen Neuronen grün fluoreszieren. Das System erfasst lebendes Gewebe mit einer ausreichend großen Auflösung um nicht nur Dendriten (bestehende Neuronenbindungen) abzubilden, sondern auch deren Dornfortsätze: kleine, keimartige Ausstülpungen, die potenziell neue Synapsen bilden.

Der Neurobiologe Karel Svoboda und seine Kollegen (Cold Spring Harbor Laboratory, Long Island) setzten dieses System ein, um bei Mäusen neuronale Netze zu untersuchen, welche die Signale der Schnurrhaare verarbeiten – und warfen damit neues Licht auf neuronale Lernprozesse:

Die Dendriten bildeten unaufhörliche neue Dornfortsätze aus. Die meisten hatten nur ein oder zwei Tage lang Bestand, doch gelegentlich blieben sie stabil. „Wir glauben, dass der hohe Durchsatz eine wichtige Rolle für die neuronale Plastizität spielt, und dass die sprießenden Dornfortsätze die Umgebung sondieren, um präsynaptische Partner auf anderen Neuronen zu finden“, erklärt Svoboda. „Falls eine bestimmte Verbindung begünstigt wird, also eine wünschenswerte Verknüpfung darstellen würde, wird die Synapse hergestellt und bleibt bestehen. Die meisten dieser Synapsen gehen jedoch in eine ungünstige Richtung und werden wieder abgebaut.“⁵⁸

Ein verwandtes Phänomen ist, dass die Netzantwort mit der Zeit zurückgeht, wenn ein bestimmtes Erregungsmuster häufig wiederkehrt. Dadurch haben neu erlernte Muster den Vorzug. Der Neurobiologe Wen-Biao Gan (School of Medicine der University of New York) stellt ähnliche Untersuchungen am visuellen Kortex von ausgewachsenen Mäusen an, die zeigen, dass der Dornfortsatz-Mechanismus langfristig Erinnerungen speichern kann: „Angenommen ein zehnjähriges Kind benutzt 1.000 Verbindungen um eine Information zu speichern. Im Alter von achtzig hat es – hin oder her – immer noch ein Viertel dieser Verbindungen. Darum können wir uns an unsere Kindheit erinnern.“ Gan erklärt außerdem: „Unser Gedanke war, dass man nicht unbedingt neuen Synapsen bilden und alte entfernen muss, um zu lernen und Erinnerung zu speichern. Das Anpassen der Stärke bereits existierender Synapsen ist ausreichend für kurzzeitiges Lernen und das Anlegen von Erinnerungen. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass [einige] wenige Synapsen gebildet oder entfernt werden, um langfristige Erinnerungen zu erzeugen.“⁵⁹

Der Grund, dass unsere Erinnerungen intakt bleiben, selbst nachdem drei Viertel der Verknüpfungen erloschen sind, ist, dass die Informationen in einer hologrammartigen Weise kodiert sind. In einem Hologramm sind Informationen in einem diffusen Muster über einen weiten Bereich verstreut. Wenn man drei Viertel eines Hologramms zerstört, hat man immer noch das ganze Bild – allerdings nur noch in drei Vierteln der Auflösung. Die Idee, dass Erinnerungen dynamisch über neuronale Regionen verteilt sind, wird unter anderem durch die Arbeit des Neurowissenschaftlers Pentti Kanerva (Redwood Neuroscience Institute)

gestützt. Dies erklärt auch, warum ältere Erinnerungen „verblassen“: Ihre Auflösung nimmt mit der Zeit ab.

Neuronenmodelle

Die Forschung ist auch zu dem Ergebnis gekommen, dass es spezielle Neuronen für bestimmte Aufgaben gibt. Ein Experiment mit Hühnern identifizierte Nervenzellen im Zwischenhirn, die darauf spezialisiert sind, den Zeitunterschied, mit dem ein Geräusch die beiden Ohren erreicht, zu ermitteln.⁶⁰ Verschiedene Neuronen reagieren dabei auf verschiedene Zeitdifferenzen. Obwohl es viele Unregelmäßigkeiten in ihrer Arbeitsweise (und der ihres Netzes) gibt, lässt sich die Funktionalität dieser Neuronen recht einfach beschreiben und wäre auch leicht zu replizieren. Scott Makeig, Neurowissenschaftler der University of California in San Diego: „Aktuelle neurobiologische Befunde deuten darauf hin, dass die genaue Synchronisation des neuronalen Inputs eine wichtige Rolle für Lernen und Gedächtnis spielt.“⁶¹

Elektrische Neuronen

Experimente des Institute for Nonlinear Science der University of California in San Diego zeigen, welches Potenzial in elektrischen Neuronenreplikaten steckt. Neuronen, natürliche wie künstliche, sind ein Musterbeispiel für sogenannte chaotische Berechnung. Jedes Neuron für sich genommen verhält sich praktisch unberechenbar. Ein komplettes neuronales Netz reagiert auf eine Eingabe (aus der Umwelt oder von einem anderen Netz) zunächst mit einem wilden Durcheinander von Signalen. Nach einer gewissen Zeit – meist nur Sekundenbruchteile – nimmt das chaotische Wechselspiel ein Ende, und ein stabiles Aktivierungsmuster setzt sich durch. Dieses Muster stellt die „Entscheidung“ des Netzes dar. Bei Mustererkennungsaufgaben (die den Großteil der Gehirnaktivität ausmachen) entspricht das Muster dem erkannten Merkmal.

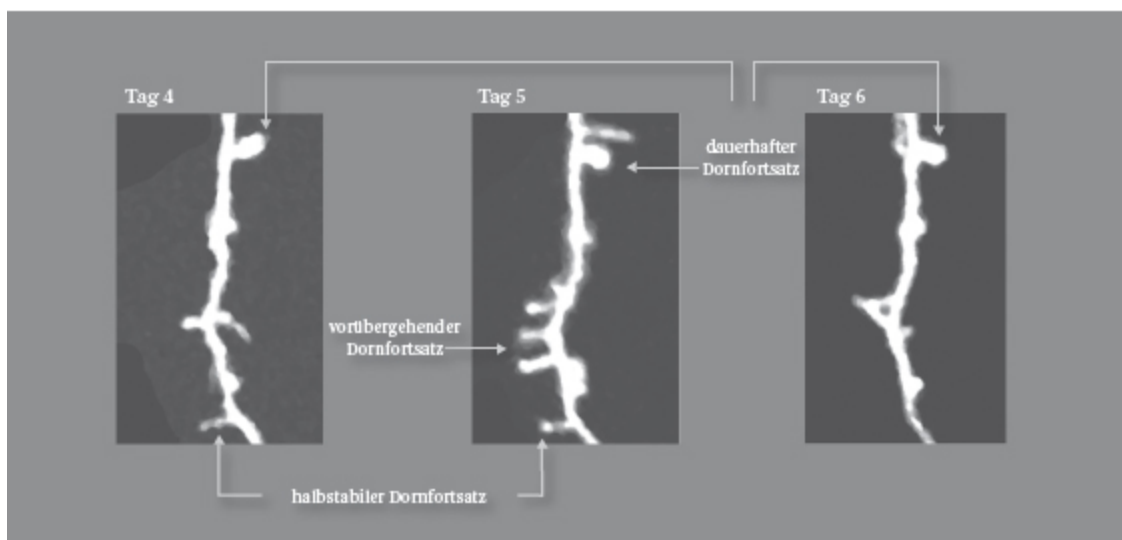
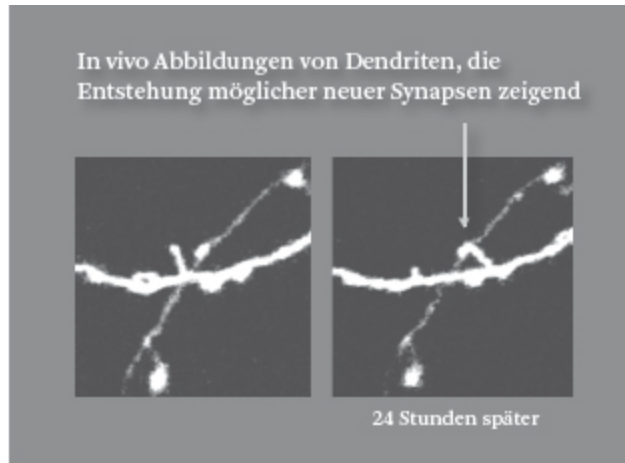
Die Forscher in San Diego gingen der Frage nach, ob auch elektrische Neuronen zu diesem chaotischen Gesellschaftstanz in der Lage sind. Dazu verdrahteten sie künstliche Neuronen mit den Nervenzellen von Langusten. Das resultierende Hybrid-Netz zeigte dasselbe Verhalten – Chaos gefolgt von einem stabilen Muster – und lieferte auch ähnliche Ergebnisse wie rein biologische Netze. Kurz gesagt, die Bioneuronen akzeptierten ihre elektrischen Artverwandten. Dies ist auch ein großer Erfolg für die zugrunde liegenden mathematischen Neuronenmodelle.

Gehirnplastizität

Schon 1861 beobachtete Paul Broca Zusammenhänge zwischen Verletzungen oder chirurgischen Eingriffen in bestimmten Gehirnregionen und dem Verlust von spezifischen Fähigkeiten wie Feinmotorik oder Sprache. Über ein Jahrhundert lang glaubten Wissenschaftler daher, derlei Fähigkeiten seien in den entsprechenden Arealen fest angelegt. Es stimmt zwar, dass Gehirnfunktionen mehr oder weniger auf bestimmte Regionen verteilt sind, doch wie wir heute wissen, kann das Gehirn die Aufgaben nach dem Ausfall eines Areals neu vergeben. Eine berühmte Studie von D. H. Hubel und T. N. Wiesel aus dem Jahre 1965 zeigte, dass nach Gehirnverletzungen (beispielsweise durch einen Schlaganfall) mitunter weitreichende Reorganisationen der Gehirnfunktionen stattfinden.⁶²

Zudem hängt die genaue Anordnung der Verbindungen und Synapsen eines Areals direkt davon ab, wie häufig dieses zum Einsatz kommt. Dank der genaueren bildgebenden Verfahren, welche die Entstehung von Dornfortsätzen und neuen Synapsen erfassen, können wir heute sehen, wie das Gehirn sich anpasst und wächst, um im wahrsten Sinne des Wortes unseren Gedanken zu folgen. Damit erhält „Ich denke, also bin ich“ eine völlig neue Bedeutung.

In vivo Abbildungen von neuronalen Dendriten Zeigt die Entstehung von Dornfortsätzen und Synapsen



In einem Experiment von Michael Merzenich und seinen Kollegen (University of California in San Francisco) musste ein Affe eine Geschicklichkeitsübung mit einem seiner Finger absolvieren, um an sein Futter zu kommen. Hirnaufnahmen vor und nach dem Versuch zeigten einen massiven Zuwachs von Synapsen und Neuronenbindungen in dem für die Steuerung des Fingers zuständigen Gehirnareal.

Edward Taub (University of Alabama) erforscht die Bereiche der Hirnrinde, welche die Tasteindrücke der Finger verarbeiten. Er verglich dazu Streichmusiker mit Menschen, die kein Instrument spielen, und fand dabei keinerlei Unterschiede im Areal der rechten Hand, aber große Unterschiede bei der linken Hand (die für das Greifen der Saiten zuständig ist): Wäre die Größe von Körperteilen proportional zu dem für sie zuständigen Gehirngewebe, so hätten die Streicher gigantische linke Hände. Die Differenz ist zwar größer bei Menschen, die das Instrument bereits als Kinder lernten, doch „selbst wenn man erst mit 40 zu Violine greift, kommt es zu Reorganisationen im Gehirn“, so Taub.⁶³

Ähnliches ergaben Auswertungen im Zusammenhang mit einer von Paula Tallal und Steve Miller (Rutgers University) für legasthenische Kinder entwickelten Software namens „Fast ForWord“. Das Programm liest Texte vor und spricht dabei Plosivlaute wie „b“ und „p“ besonders langsam aus (basierend auf der Beobachtung, dass Legastheniker häufig Probleme haben, solche Laute zu unterscheiden). Diese spezielle Vorlesemethode soll den Kindern dabei helfen, selbst besser lesen zu lernen. John Gabrieli (Stanford University) stellte bei fMRI-Untersuchungen fest, dass Kinder, die besagte Software nutzen, tatsächlich erhöhte Aktivität im linken präfrontalen Areal aufweisen, welches an der Sprachverarbeitung beteiligt ist.

Auch Gedanken, die nicht in eine physische Handlung umgesetzt werden, können zur neuronalen Umstrukturierung führen. Dr. Alvaro Pascual-Leone (Harvard University) untersuchte die Gehirne von Freiwilligen, vor und nach einer einfachen Klavierübung, und stellte direkte Auswirkungen im motorischen Kortex fest. Bei einer zweiten Gruppe, die lediglich ans Klavierspielen denken sollte, ohne einen Finger zu rühren, stellten sich just dieselben neuronalen Veränderungen ein.⁶⁴

FMRI-Untersuchungen über das Lernen von visuell-räumlichen Zusammenhängen zeigten, dass die neuronale Verknüpfungstopologie sich während einer einzigen Lerneinheit schnell verändern kann. Forscher verzeichneten Veränderungen der Verknüpfungen zwischen dem zum Scheitellappen verlaufenden dorsalen Pfad (welcher räumliche Informationen und Positionsangaben transportiert) und dem zum Schläfenlappen führenden ventralen Pfad (welcher Informationen für Objekterkennung transportiert);⁶⁵ die Veränderungsrate war dabei direkt proportional zum Lernfortschritt.⁶⁶

Forscher der University of California in San Diego entdeckten einen wichtigen Unterschied zwischen der Entstehung von langfristigen und kurzfristigen Erinnerungen. Die Wissenschaftler beobachteten mithilfe eines hochauflösenden Scanners chemische Veränderungen in Synapsen des Hippocampus – jenem Hirnteil, in dem langfristige Erinnerungen zu entstehen scheinen.⁶⁷ Sie stellten fest, dass bei der Stimulation einer Zelle das Protein Aktin in Richtung anderer, synaptisch angeschlossener Neuronen wandert, wodurch wiederum auch das Aktin in diesen Zellen angeregt wird, sich von der stimulierten Zelle wegzubewegen. Diese Verschiebung hält zunächst nur wenige Minuten an, doch nach häufigen Wiederholungen stellen sich bleibende Veränderungen ein.

„Diese kurzfristigen Verschiebungen sind Teil der normalen Kommunikation zwischen den Nervenzellen“, sagt der federführende Autor Michael A. Colicos:

Dauerhafte Veränderungen treten erst ein, wenn die Neuronen viermal innerhalb einer Stunde stimuliert werden. Dann teilt sich die Synapse und neue Synapsen entstehen – eine Veränderung, die vermutlich für den Rest des Lebens bleibt. Die Analogie zum menschlichen Gedächtnis besteht darin, dass man sich Dinge, die man einmal hört oder sieht, nur wenige Minuten merkt. Wenn man sie jedoch über eine Stunde hinweg immer wieder hört oder sieht, erinnert man sich sehr viel länger daran. Eindrücke, die sich oft genug wiederholen, merken wir uns für den Rest unseres Lebens. Wenn ein Axon einmal zwei neue Verbindungen gebildet hat, dann sind diese Verbindungen auch stabil, und es gibt keinen Grund, dass sie wieder verschwinden sollten. Es ist zu erwarten, dass sie lebenslänglich da bleiben.

„Es ist wie mit dem Klavierüben“, meint der Koautor Yukiko Goda: „Wenn man ein Stück immer und immer wieder spielt, prägt es sich tief ins Gedächtnis ein.“ Passend dazu berichten S. Lowel und W. Singer in einem *Science*-Artikel über Hinweise auf eine schnelle, dynamische

Neuentstehung von neuronalen Verbindungen im visuellen Kortex, ganz nach dem Hebbschen Prinzip: „What fires together, wires together“⁶⁸.

Eine in *Cell* veröffentlichte Studie gewährt einen weiteren Einblick in die Entstehung von Erinnerungen: Wie sich herausstellt, verändert das Protein CPEB in Synapsen seinen Zustand, um Erinnerungen zu speichern.⁶⁹ Überraschend ist dabei, dass das CPEB während dieses Memorisierungsprozesses als Prion vorliegt. Die Koautorin Susan Lindquist (Leiterin des Whitehead Institute for Biomedical Research): „Wir wissen bereits einiges darüber, wie das Gedächtnis funktioniert, doch wir hatten bisher keine klare Vorstellung vom eigentlichen Speichermedium. Diese Studie liefert Hinweise, was das Speichermedium sein könnte – es ist aber derart überraschend, dass prionische Aktivität involviert sein soll. [...] Das [...] würde bedeuten, dass Prionen nicht nur eigenwillige Kreationen der Natur sind, sondern an fundamentalen Prozessen beteiligt sind.“ Wie in **Kapitel 3** erwähnt, sind Prionen auch für elektrische Datenspeicher von Interesse.

Die Neurowissenschaft ist auch – ganz im Sinne von Sigmund Freud – auf Mechanismen gestoßen, welche unerwünschte Erinnerungen unterdrücken.⁷⁰ In einer fMRI-Studie der Stanford University sollten die Testpersonen versuchen, Informationen zu vergessen, die sie sich zuvor eingeprägt hatten. Dies führte zu erhöhter Aktivität in Bereichen des Stirnlappens, welcher mit Gedächtnisunterdrückung assoziiert ist, während der für Erinnerung zuständige Hippocampus relativ untätig blieb. Diese Ergebnisse „bestätigen die Existenz eines aktiven Vorgang des Vergessens und etablieren ein neurobiologisches Modell für die Erforschung des willentlichen Vergessens“, schreiben der Psychologieprofessor John Gabrieli und seine Kollegen. Gabrieli kommentiert: „Die große Neuigkeit ist, dass wir zeigen konnten, dass das Gehirn unerwünschte Erinnerungen blockiert – dass ein solcher Mechanismus wirklich existiert und dass er biologische Ursachen hat. Das zerstreut alle Zweifel daran, ob es im Gehirn so etwas gibt – und nicht doch nur auf Illusion beruht.“

Abgesehen von neuen Verknüpfungen entstehen auch fortwährend neue Nervenzellen. Das Gehirn verfügt über einen Vorrat von Stammzellen, die sich kontinuierlich vermehren. Bei der Replikation verwandeln sich manche

der Stammzellen in die unterstützenden Gliazellen – Astrozyten und Oligodendrozyten – oder aber auch in Nervenzellen. Letztere differenzieren dann weiter in spezielle Neuronenarten aus. Dazu müssen die Zellen jedoch ihren Ursprung, die Hirnventrikel, verlassen, was nur in etwa der Hälfte der Fälle gelingt – ähnlich dem Aussortieren eines Teils der Neuronen in frühen Entwicklungsphasen des Gehirns bei Embryonen und Kleinkindern. Durch direkte Injektion von Stammzellen in den Zielbereichen versuchen Forscher diesen Migrationsprozess zu umgehen und mithilfe von Wirkstoffen die Neurogenese (Entstehung neuer Nervenzellen) anzuregen, um durch Krankheit oder Unfall versehrtes Nervengewebe reparieren zu können.⁷¹

Ein Experiment der Genetiker Fred Gage, G. Kempermann und Henriette van Praag (Salk Institute for Biological Studies) zeigte, dass Neurogenese durch Umwelteindrücke ausgelöst wird: Nach der Umsiedlung von Mäusen aus einem eintönigen Käfig in eine anregendere Umgebung verdoppelte sich die Zellteilungsrate im Hippocampus im Gehirn der Tiere.⁷²

Modellierung von Gehirnarealen

Höchstwahrscheinlich besteht das menschliche Gehirn in der Hauptsache aus einer großen Anzahl relativ kleiner verteilter Systeme, embryologisch zu einem komplexen Verbund zusammengefügt, welcher teilweise (aber nur teilweise) durch serielle, symbolverarbeitende Systeme gesteuert ist, die später hinzukommen. Die einzelnen subsymbolischen Systeme, in denen die eigentliche Arbeit passiert, grenzen jedoch von Natur aus ihre inneren Abläufe vom restlichen Gehirn ab. Diese Tatsache für sich genommen könnte Licht darauf werfen, wie Menschen so viele Dinge tun können, ohne genau zu wissen wie.

MARVIN MINSKY UND SEYMOUR PAPERT⁷³

Vernunft ist nicht alles. Da ist auch noch ein riesiges Sammelsurium an hart erarbeiteten, praktischen Kenntnissen – eine Vielfalt an goldenen Regeln und Ausnahmen derselben, an Dispositionen, Tendenzen, Abwägungen und Kontrollmaßnahmen.

MARVIN MINSKY

Neben Erkenntnissen über die Plastizität und Funktionsweise des Gehirns allgemein entstehen auch detaillierte Modelle der einzelnen Areale. Neuromorphe Modelle und Simulationen folgen stets dicht auf die

Verfügbarkeit neuer Informationen. Die schnelle Umsetzung von Daten über Gehirnneuronen und deren Verknüpfungen in brauchbare Modelle und Simulationen sollten die weitverbreiteten Zweifel, ob wir fähig sind, unser eigenes Gehirn zu verstehen, ausräumen.

Meist ist es nicht nötig, Synapse für Synapse jede Nichtlinearität zu modellieren. Simulationen von Arealen, in denen Erinnerungen und Kenntnisse in einzelnen Neuronen und Verbindungen gespeichert sind, beruhen zwar auf detaillierten Zellmodellen. Doch selbst solche Simulationen erfordern weit weniger Rechenaufwand, als in der Gesamtheit der neuronalen Komponenten steckt. Das gilt auch für die unten beschriebene Simulation des Kleinhirns.

Subneuronale Komponenten sind detailreich, komplex und nichtlinear, und die Billionen von neuronalen Verknüpfungen bilden chaotische, teilweise zufällige Muster. Dennoch haben wir in den letzten zwanzig Jahren bedeutende Fortschritte gemacht bei der mathematischen Beschreibung der adaptiven nichtlinearen Systeme, die aus diesem Wirrwarr hervorgehen. Wir müssen in der Regel nicht jedem dendritischen „Schnörkel“ Beachtung schenken. Wir können die Funktionsweise von Gehirnarealen verstehen, indem wir ihre Dynamik auf einer angemessenen Analyseebene betrachten.

Wir erzielen bereits signifikante Erfolge mit Modellen und Simulationen weiträumiger Gehirnbereiche. Diese Simulationen erweisen sich beim Vergleich mit Daten aus psychophysischen Experimenten mit Versuchspersonen als beeindruckend realistisch. Angesichts der immer noch relativ ungenauen Mess- und Aufnahmetechnik sind unsere Modellierungserfolge ein Beleg für unsere Fähigkeit, aus der Datenrohmasse die richtigen Schlüsse zu ziehen.

Die im Folgenden beschriebenen laufenden Projekte sind nur einige Beispiele für die erfolgreiche Modellierung von Gehirnarealen.

Ein neuromorphes Modell: das Kleinhirn

Eine der Fragen in *The Age of Spiritual Machines* lautet: Wie gelingt es einem Zehnjährigen, einen Baseball aus der Luft zu fangen?⁷⁴ Das Kind

sieht den Ball nur aus der Ferne. Um aus diesem visuellen Eindruck die tatsächliche Flugbahn im dreidimensionalen Raum zu errechnen, müssen schwierige Differenzialgleichungen gelöst werden. Weitere Gleichungen sind nötig, um den weiteren Bahnverlauf zu berechnen, und schließlich muss das Ergebnis in die notwendigen Laufbewegungen im Feld übersetzt werden. Wie bewältigt der junge Feldspieler all das innerhalb weniger Sekunden – ohne Computer und ohne jegliche Kenntnisse der Differenzialrechnung? Offenbar stellt er all diese Berechnungen nicht bewusst an – doch wie löst sein Gehirn diese Aufgabe?

Seit der Veröffentlichung von *The Age of Spiritual Machines* hat sich unser Verständnis von Lernprozessen beträchtlich erweitert. Wie vermutet, kommt kein mentales dreidimensionales Bewegungsmodell zum Einsatz. Vielmehr findet eine direkte Übersetzung der Informationen über die Ballbewegung aus dem Sichtfeld in die erforderlichen Muskelbewegungen der Arme und Beine statt. Alexandre Pouget (University of Rochester) und Lawrence H. Snyder (Washington University) haben mathematische „Basisfunktionen“ beschrieben, durch die sich solche Übersetzungen ausdrücken lassen.⁷⁵ Wie aktuelle Modelle des Kleinhirns zeigen, sind die dortigen neuronalen Schaltungen in der Lage, eben solche sensomotorische Übersetzungen zu erlernen und auszuführen. Wenn wir durch Trial-and-error* sensomotorische Fähigkeiten wie das Fangen eines Baseballs erlernen, so trimmen wir dabei die Synapsen im Kleinhirn auf die entsprechenden Basisfunktionen. Mittels dieser Basisfunktionen führt das Kleinhirn zwei Arten von Transformationen durch: vom gewünschten Effekt auf die erforderliche Handlung („umgekehrte interne Modelle“) und von möglichen Handlungen auf den zu erwartenden Effekt („vorwärts gerichtete interne Modelle“). Tomaso Poggio hat darauf hingewiesen, dass Basisfunktionen auch Lernprozesse jenseits von Motorik beschreiben können.⁷⁶

Das Kleinhirn ist ein grau-weißer, baseballgroßer, bohnenförmiger Bereich hinter dem Hirnstamm, und enthält über die Hälfte aller Nervenzellen. Es erfüllt eine Reihe kritischer Funktionen, einschließlich sensomotorischer Koordination, Gleichgewicht, Steuerung von Bewegungsabläufen und Abschätzen der Auswirkungen von Aktionen

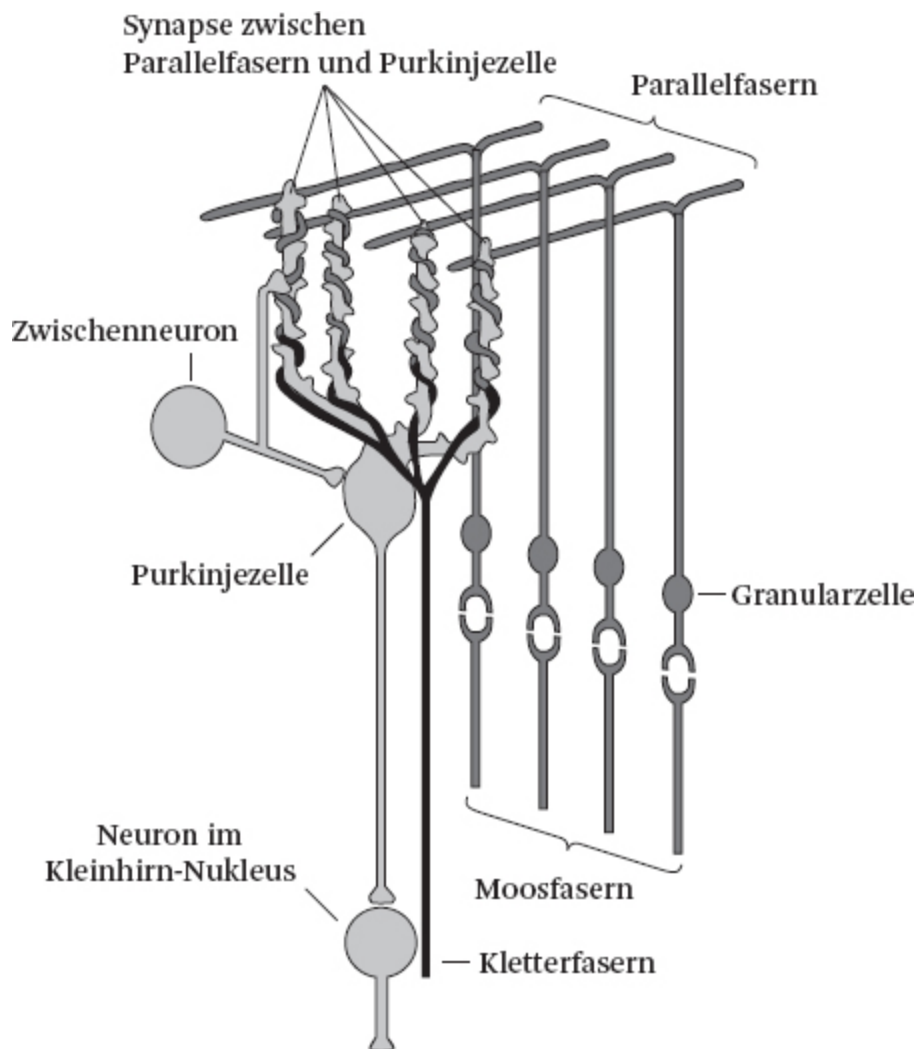
(sowohl eigener als auch derer anderer Personen und Objekte).⁷⁷ Trotz der Vielzahl an Funktionen und Tätigkeiten ist die synaptische und zelluläre Zusammensetzung des Kleinhirns recht einheitlich und beinhaltet nur wenige Arten von Neuronen. Das Kleinhirn scheint also eine ganz bestimmte Art von Berechnungen auszuführen.⁷⁸

Die Verarbeitungsprozesse des Kleinhirns sind also recht gleichförmig. Wir können uns anhand seiner verschiedenen Inputs aus der Großhirnrinde (über die Hirnnervenkerne und die Kleinhirn-Moosfasern) und aus anderen Gehirnteilen (insbesondere über die „Kletterfaser“ aus dem „unteren Olivenkern“) dennoch ein Bild von seiner Funktionalität machen. Das Kleinhirn wertet den sensorischen Informationsfluss aus und steuert unsere physischen Bewegungen.

Das Kleinhirn ist auch ein gutes Beispiel dafür, dass die Kapazität des Gehirns weit jenseits seines kompakten Genoms liegt. Der größte Teil der genetischen Information über das Gehirn beschreibt Struktur und Verhalten der verschiedenen Arten von Nervenzellen (einschließlich ihrer Dendriten, Dornfortsätze und Synapsen). Recht wenig genetischer Code befasst sich mit der eigentlichen „Verdrahtung“. Im Kleinhirn wiederholt sich ein und dasselbe Verknüpfungsmuster mehrere Milliarden Mal. Das Genom enthält natürlich keine spezifischen Informationen für jede einzelne Instanz dieses Musters, sondern nur gewisse Angaben, wie oft und wo die Struktur kopiert werden soll. (Genauso wie das Genom nicht die genaue Position jeder Zelle eines Organs bestimmt).

Der Output des Kleinhirns spricht bis zu etwa zweihundert Alpha-Motoneuronen an, welche Befehle an die etwa sechshundert Muskeln des Körpers senden. Die Signale an Alpha-Motoneuronen spezifizieren noch nicht die exakten Muskelbewegungen, sondern sind in einer kompakten, noch wenig erforschten Weise kodiert. Die endgültigen Signale an die Muskeln entstehen auf tieferen Ebenen des Nervensystems, im Hirnstamm und im Rückenmark, um genau zu sein.⁷⁹ Bei Oktopussen ist dieses Organisationsprinzip besonders ausgeprägt: Das Zentralnervensystem sendet abstrakte Befehle an die einzelnen Tentakeln (etwa: „Greif das Objekt und bring es näher!“) und überlassen den peripheren Nervensystemen die Einzelheiten der Durchführung.⁸⁰

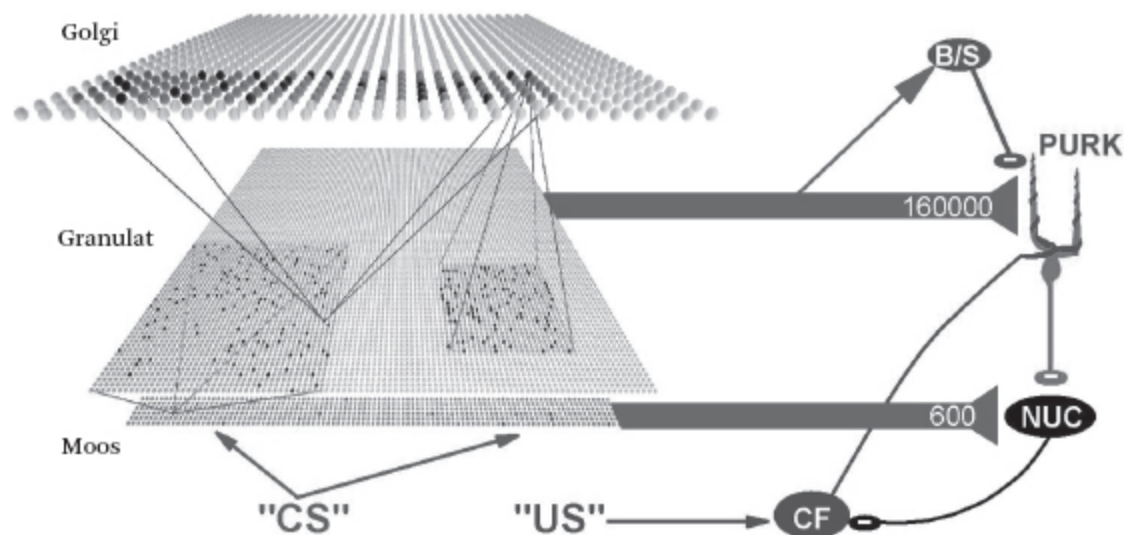
Sich stark wiederholendes Verknüpfungsmuster des Kleinhirns



In den letzten Jahren haben wir viel über die Rolle der drei Hauptnerventypen des Kleinhirns herausgefunden. Das sogenannte Kletterfaser-System scheint das Training des Kleinhirns zu steuern. Der meiste Output des Kleinhirns kommt aus den großen Purkinjezellen (benannt nach Johannes Purkinje, der sie 1837 entdeckte), die jeweils Signale aus etwa zweihunderttausend Synapsen integrieren. (Für gewöhnliche Neuronen üblich sind etwa einhunderttausend eingehende Signale). Dieser Input kommt größtenteils von Granularzellen – den kleinsten Neuronen mit einer Dichte von etwa sechs Millionen pro Quadratmillimeter. Untersuchungen der Rolle des Kleinhirns beim

motorischen Erlernen von Handschrift im Kindesalter ergaben, dass Purkinjezellen Bewegungsabläufe verarbeiten, wobei jede Zelle für einen bestimmten Ausschnitt der Bewegungsdaten zuständig ist.⁸¹ Natürlich benötigt das Kleinhirn auch kontinuierlich Informationen aus dem visuellen Kortex. Die Forscher fanden außerdem einen Zusammenhang zwischen der Struktur des Kleinhirns und der Tatsache, dass sich der Wölbungsgrad der Handschrift invers zur Schreibgeschwindigkeit verhält – dass man also schneller mit geraden Linien als mit runden Buchstaben schreiben kann.

Kleinhirnmodell und -simulation der University of Texas



Dank ausgiebiger Zell- und Tierversuche verfügen wir über beeindruckende mathematische Beschreibungen der Physiologie und Organisation der Synapsen des Kleinhirns⁸², der Kodierung seiner Input- und Outputdaten, sowie der darin vollzogenen Transformationen.⁸³ Javier F. Medina, Michael D. Mauk und Kollegen (University of Texas) erstellten anhand von Daten aus verschiedenen Studien eine detaillierte Bottom-up-Simulation des Kleinhirns. Diese enthält über zehntausend simulierte Neuronen und dreihunderttausend Synapsen und beinhaltet alle wichtigen Zelltypen.⁸⁴ Der Computer legt dabei die Verknüpfungen der Zellen und Synapsen fest, indem er die Areale in Reaktion auf Stimulation nach bestimmten Regeln „verdrahtet“; Regeln, welche den stochastischen

(eingeschränkt zufälligen) Methoden der Gehirnentwicklung aus dem genetischen Code entsprechen.⁸⁵ Diese Simulation ließe sich ohne Weiteres auf eine größere Anzahl von Synapsen und Zellen ausweiten.

Die texanischen Forscher unterwarfen ihre Simulation einem klassischen Konditionierungsexperiment und verglichen die Ergebnisse mit denen ähnlicher Versuche mit echten Menschen. In Letzteren ging es um die Assoziation eines bestimmten Tons mit einem Luftstoß am Augenlid, der ein Blinzeln erzwingt. Wenn der Luftstoß und der Ton ein bis zweihundert Mal gleichzeitig auftraten, lernte die Versuchsperson den Zusammenhang und ihr Auge schloss sich fortan, wenn sie lediglich den Ton hörte. Wenn der Ton nun oft genug ohne Luftstoß erklang, lernte das Subjekt wiederum, die beiden Reize zu unterscheiden (die neuronale Reaktion wurde ausgelöscht), das Lernen funktionierte also in beide Richtungen. Nach Einstellung der Parameter lieferte die Simulation bei vergleichbarer Konditionierung ähnliche Ergebnisse wie die Versuche mit Menschen und Tieren. Auch simulierte Läsionen (durch Deaktivierung eines Teils des simulierten neuronalen Netzes) hatten ähnliche Auswirkungen wie echte Läsionen bei Kaninchen.⁸⁶

Aufgrund des einheitlichen Aufbaus und Verknüpfungssystems des Kleinhirns sind seine Input-Output-Transformationen relativ gut erforscht – verglichen mit anderen Teilen des Gehirns. Die entscheidenden Formeln benötigen noch weitere Feinanpassung, doch die beschriebene Simulation kann sich schon durchaus sehen lassen.

Ein anderes Beispiel: Watts Modell des auditorischen Systems

Ich glaube der Weg zu gehirnartiger künstlicher Intelligenz führt über ein echtzeitfähiges Modellsystem, das so detailgenau ist, dass man jede einzelne Berechnung mit Messungen am Original [dem Gehirn] abgleichen kann. Das Modell muss in Echtzeit laufen, damit wir es mit der vollen Komplexität der realen Welt konfrontieren können. Die Auflösung des Modells muss ausreichend sein, um es mit dem Original vergleichen und die Informationsverarbeitung durch alle Stufen verfolgen zu können. Mead zufolge⁸⁷ muss die Modellentwicklung an den Rändern des Systems (etwa bei den Sensoren) beginnen, wo die Vorlage bereits gut erforscht ist, und kann sich dann in die weniger erforschten Bereiche vorarbeiten. [...] Auf diese Weise kann ein

solches Modell entscheidend zum Verständnis des Gehirns beitragen, anstatt nur bereits vorhandenes Wissen widerzuspiegeln. Vor dem Hintergrund der großen Komplexität des Systems könnte es sogar sein, dass die einzige praktikable Möglichkeit, es zu verstehen, darin besteht, ein funktionsfähiges Modell zu bauen, beginnend mit den Sensoren und mittels unserer neu erlangten Fähigkeit *die Komplexität des Systems zu visualisieren*. Ein solches Vorgehen könnte man als *Reverse Engineering des Gehirns* bezeichnen. [...] Wohlgemerkt vertrete ich nicht das blinde Kopieren von Strukturen, deren Sinn wir nicht verstehen, so wie Ikarus, der sich naiver Weise Flügel aus Wachs und Federn basteln wollte. Vielmehr müssen wir der Komplexität und Vielfalt bereits erforschter Ebenen Rechnung tragen, bevor wir in höhere Ebenen vordringen.

LLOYD WATTS⁸⁸

Ein Paradebeispiel für die Modellierung eines Gehirnteils ist die umfassende Replikation des menschlichen auditorischen Systems durch Lloyd Watts und dessen Mitarbeiter.⁸⁹ Ihre Arbeit beruht auf neurobiologischen Untersuchungen bestimmter Neuronenarten sowie auf Informationen über die zwischenneuronale Verknüpfungsstruktur. Das Modell hat viel Gemeinsamkeit mit dem menschlichen Hörsystem und kann Klänge lokalisieren und identifizieren. Es beinhaltet fünf parallele Verarbeitungswege für auditorische Informationen und liefert aussagekräftige Zwischenergebnisse für jeden Schritt der neuronalen Informationsverarbeitung. Watts Modell hat die Form eines echtzeitfähigen Computerprogramms. Das Projekt ist noch nicht vollendet, liefert jedoch bereits einen Beweis für die Umsetzbarkeit von neurobiologischen Modellen und Verknüpfungsdaten in lauffähige Simulationen. Die Software basiert anders als das oben beschriebene Kleinhirnmodell nicht auf der Reproduktion der einzelnen Neuronen und Verknüpfungen, sondern auf in den einzelnen Arealen vollzogenen Transformationen.

In Watts Software fließen vielfältige Erkenntnisse aus Experimenten zur menschlichen Hörfähigkeit und akustischen Differenzierung ein. Watts benutzte sein Modell als Präprozessor für Spracherkennungssysteme, wodurch diese in der Lage waren, die Stimme eines einzelnen Sprechers von allen Hintergrundgeräuschen zu trennen (der „Cocktailparty-Effekt“). An diesem menschlichen Kunststück waren Spracherkennungsprogramme bislang gescheitert.⁹⁰

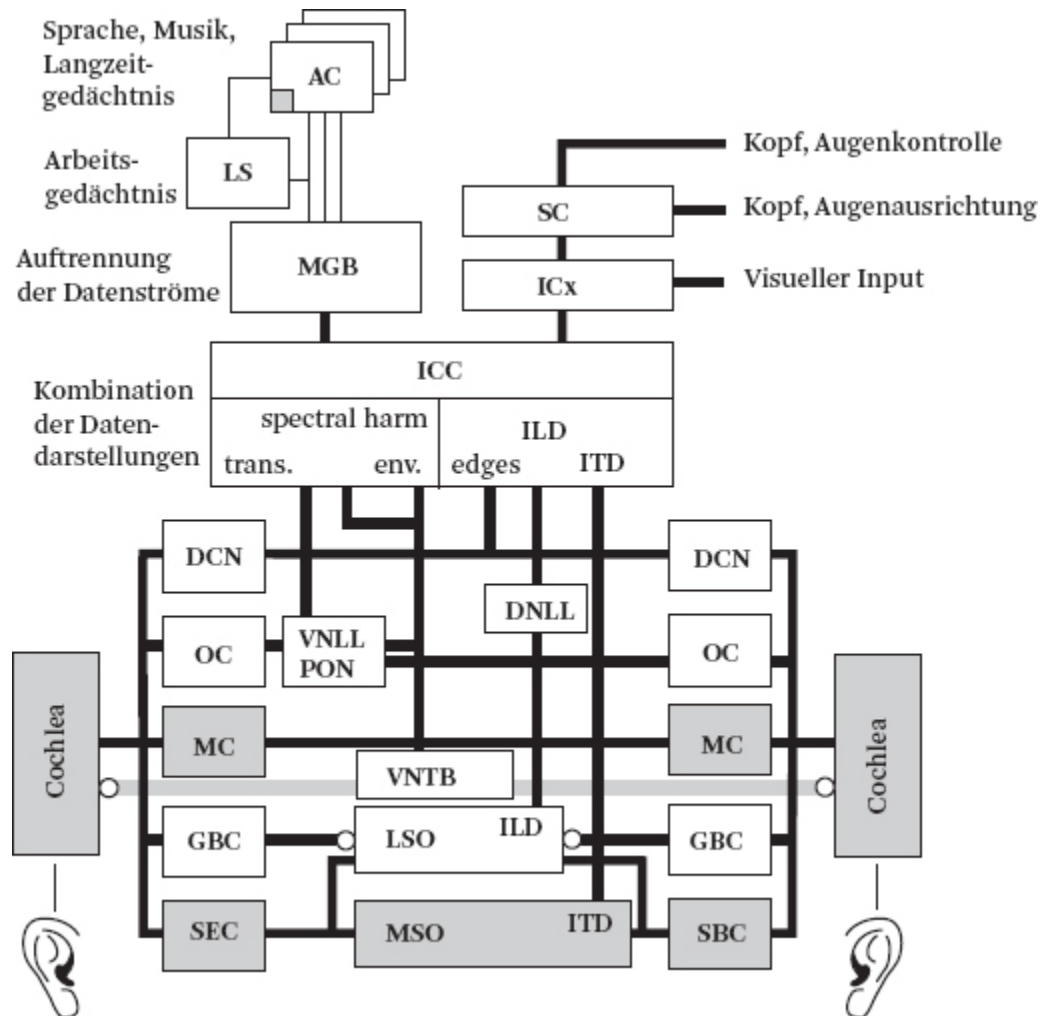
Watts Modell für die Hörschnecke zeichnet sich unter anderem durch folgende Eigenschaften des menschlichen Hörapparates aus:

Spektralempfindlichkeit (wir hören bestimmte Frequenzen besser als andere), zeitabhängige Antwort (am Timing von Geräuschen erkennen wir die räumliche Position ihrer Quelle), Maskierungseffekte, nichtlineare, frequenzabhängige Amplituden-Kompression (die einen größeren Dynamikumfang ermöglicht, also das gleichzeitige Hören von lauten und leisen Klängen) und Verstärkungsregelung. Die Resultate sind direkt anhand von biologischen und psychophysischen Daten verifizierbar.

Der nächste Modellabschnitt ist der Nucleus cochlearis („Schneckenkern“), den Gordon M. Shepherd⁹¹ (Professor für Neurowissenschaften und Neurobiologie an der Yale University) als „eine der am besten verstandenen Gehirnregionen“ beschreibt.⁹² Watts Simulation des Nucleus basiert auf einer Arbeit von E. Young, welche detailliert die „essenziellen Zellarten“ beschreibt, „die verantwortlich sind für die Messung des Energiespektrums, Abstimmung von Einschwingvorgängen, Feinabstufung von Spektralkanälen, Empfindlichkeit für temporale Signaturen in Spektralkanälen und spektrale Gefälle und Zäsuren, sowie für die optimale Anpassung der Amplitudenverstärkung, für maximale Empfindlichkeit innerhalb des eingeschränkten, durch neuronale Feuerraten kodierbaren Bereichs“.⁹³

Das Modell erfasst noch viele andere Details, wie die im medialen oberen Olivenkomplex ermittelte Lautzeitdifferenz⁹⁴, die im lateralen oberen Olivenkomplex errechnete Pegeldifferenz sowie Normalisierungen und Abstimmungen durch die Zellen des Colliculus inferior.⁹⁵

Reverse Engineering des menschlichen Gehirns: Fünf parallele auditorische Verarbeitungswege



Reverse Engineering des menschlichen Gehirns: fünf parallele Verarbeitungswege⁹⁶

Das visuelle System

Wir wissen genug über die Kodierung visueller Informationen für die Entwicklung von Netzhautimplantaten, die auch schon ersten Patienten implantiert wurden.⁹⁷ Jedoch liegt die Erforschung des visuellen Systems –

aufgrund dessen relativer Komplexität – weit hinter der Erforschung des auditorischen Systems zurück. Wir haben vorläufige Modelle für die Funktion zweier visueller Areale (namens V1 und MT), wenn auch nicht auf Ebene einzelner Neuronen. Es gibt jedoch sechsunddreißig weitere visuelle Areale, die wir entweder mit sehr hoher Auflösung durchleuchten oder mit Sensoren bestücken müssen, um ihre genauen Funktionen festzustellen.

Tomaso Poggio (MIT) ist ein Pionier der visuellen Verarbeitung und unterteilt diese in zwei Tätigkeiten: Erkennen und Kategorisieren.⁹⁸ Erstere ist, Poggio zufolge, relativ leicht zu verstehen, immerhin gibt es bereits kommerzielle Gesichtserkennungssysteme, welche als Bestandteil von Sicherheitssystemen zur Personenkontrolle oder an Bankautomaten zum Einsatz kommen.⁹⁹ Kategorisieren – beispielsweise das Unterscheiden zwischen Menschen und Autos oder zwischen Autos und Hunden – ist eine kompliziertere Angelegenheit, wobei es auch dabei Fortschritte gibt.¹⁰⁰

Evolutionär ältere Schichten des visuellen Systems sind größtenteils vorwärtsgerichtet (also nicht rückgekoppelt) und erkennen Schritt für Schritt immer komplexere Merkmale.¹⁰¹ Poggio und Maximilian Riesenhuber schreiben: „Einzelne Neuronen im hinteren unteren Schläfenlappen von Makaken sind vermutlich [...] [auf] die Erkennung von tausenden komplexen Formen [geeicht].“ Dass visuelle Erkennung auf einem vorwärtsgerichteten System basiert, legen MEG-Untersuchungen nahe, die zeigen, dass das visuelle System etwa 150 Millisekunden benötigt, um ein Objekt zu erkennen. Das entspricht der Latenzzeit der Zellen im unteren Scheitellappen – offenbar nicht genug Zeit für Rückkopplungen.

In jüngsten Experimenten kam ein hierarchisches System zum Einsatz, das zunächst Merkmale identifiziert, auf welche Analysen höherer Ebene dann zurückgreifen können. Studien an Makaken deuten darauf hin, dass Neuronen im unteren Scheitellappen auf komplexe Eigenschaften von Objekten reagieren, auf welche die Tiere trainiert wurden. Die meisten Neuronen reagieren dabei lediglich auf eine bestimmte Ansicht des Objekts, manche erkennen es jedoch unabhängig von der Perspektive. Makaken sind auch das Subjekt vieler anderer Studien, bezüglich bestimmter Zellarten,

Verknüpfungsmustern und abstrakten Beschreibungen des Informationsflusses.¹⁰²

Viele Autoren gehen davon aus, dass komplexe Mustererkennung auf einer Methode basiert, die ich als „Hypothese und Test“ bezeichne: Die Hirnrinde macht eine Vermutung darüber, was sie sieht, und überprüft, ob die Merkmale im Sichtfeld tatsächlich der Hypothese entsprechen.¹⁰³ Oft sind wir viel mehr auf das Aufstellen von Vermutungen konzentriert, als auf ihre Überprüfung, weshalb Menschen häufig das sehen und hören, was sie erwarten, anstatt das, was wirklich ist. „Hypothese und Test“ ist auch für computergestützte Mustererkennung ein nützliches Konzept.

Unsere Augen scheinen uns gestochen scharfe Bilder zu übermitteln. Was die Sehnerven tatsächlich übertragen sind jedoch lediglich Umrisse und Anhaltspunkte über Sichtfeldausschnitte von Interesse. Was wir sehen, ist eigentlich größtenteils eine Halluzination, die auf der Interpretation von extrem unscharfen, parallelen visuellen Kanälen mithilfe des kortikalen Gedächtnisses beruht. Eine 2001 in *Nature* veröffentlichte Studie von Frank S. Werblin (Professor für Molekular- und Zellbiologie der University of California in Berkeley) und Dr. med. Boton Roska hat gezeigt, dass der Sehnerv zehn bis zwölf Informationskanäle überträgt, die jeweils nur minimale Informationen über die jeweilige Szenerie enthalten.¹⁰⁴ Ein Teil des sogenannten Ganglions sendet lediglich Informationen über Kanten (Kontraste) im Bild. Ein anderer Teil erkennt dagegen große einfarbige Flächen, während sich ein dritter Bereich nur mit dem Hintergrund von Objekten befasst.



Sieben der etwa zwölf Darstellungen, die das Auge aus visuellen Eindrücken extrahiert und an das Gehirn sendet.

„Wir glauben die Welt völlig klar zu sehen, dabei empfangen wir lediglich Hinweise, Kanten in Raum und Zeit“, kommentiert Werblin. „Diese zwölf Bilder von der Welt sind die einzige Information, die wir je über die Außenwelt haben werden, und aus diesen zwölf spärlichen Bildern rekonstruieren wir den Detailreichtum der sichtbaren Welt. Ich bin neugierig, wie die Natur diese zwölf schlichten Kanäle ausgewählt hat und wie es sein kann, dass sie uns mit allen nötigen Informationen versorgen.“ Solche Entdeckungen versprechen beträchtliche Fortschritte bei der Entwicklung künstlicher Systeme, die das Auge, die Netzhaut und einen Teil der Sehnerven ersetzen können.

Bereits in **Kapitel 3** habe ich den Robotikpionier Hans Moravec erwähnt, der die Bildverarbeitung durch die Netzhaut und einige visuelle Gehirnnareale nachkonstruiert hat. Moravec entwickelt seit über dreißig Jahren Systeme, welche nach Vorbild unseres visuellen Systems Repräsentationen der Welt erzeugen. Seit Kurzem steht genug Rechenleistung für Merkmalerkennung auf menschlichem Niveau zu Verfügung, und so benutzt Moravec seine Computersimulationen, um eine neue Generation von Robotern mit Sehsystemen auszustatten, die so gut sind wie das menschliche, und die Roboter somit befähigen, durch unvorhersehbare, komplexe Umgebungen zu navigieren.¹⁰⁵

Carver Mead entwickelte erstmals neuronale Chips, die Transistoren in ihrem ursprünglichen Analogmodus betreiben, was eine effiziente Emulation der von Natur aus analogen Verarbeitung ermöglicht. Mead präsentierte einen Chip, der auf diese Weise die Funktionen der Netzhaut übernimmt und einige Transformationen der Sehnerven durchführt.¹⁰⁶

Eine besondere Art visueller Erkennung und einer der Schwerpunkte des Max-Planck-Instituts für Biologie in Tübingen ist Bewegungserkennung. Das Grundprinzip ist einfach: Das Signal an einem Rezeptor wird mit dem zeitverzögerten Signal eines benachbarten Rezeptors verglichen.¹⁰⁷ Dieses Modell funktioniert gut bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit – mit darüber hinaus wachsender Geschwindigkeit nimmt die Antwort des Bewegungsrezeptors überraschenderweise ab. Dies steht im Einklang mit experimentellen Befunden bei Tieren (anhand von Verhalten und Untersuchungen der neuronalen Aktivität) und bei Menschen (anhand von Wahrnehmungsberichten).

Weitere Modellierungsprojekte: Hippocampus und der olivocerebellare Trakt

Der Hippocampus ist wesentlich für das Lernen neuer Informationen und das Speichern von Langzeiterinnerungen. Ted Berger und seine Kollegen (University of Southern California) erstellten eine Zuordnung von Eingangs- und Ausgangssignalen des Hippocampus. Sie stimulierten Scheiben des Hippocampus einer Ratte, um festzustellen, wie Input und

Output zusammenhängen.¹⁰⁸ Dann entwickelten die Forscher ein echtzeitfähiges mathematisches Modell für die Signaltransformationen in bestimmten Schichten und implementierten dieses auf einem Chip.¹⁰⁹ Sie planen nun den Chip zu testen, indem sie die entsprechenden Bereiche bei Versuchstieren deaktivieren, den Gedächtnisverlust überprüfen und versuchen, die Gehirnfunktionen durch Einpflanzen des Chips wiederherzustellen.

Eines Tages könnte dieses Verfahren bei Schlaganfallpatienten, Epileptikern oder Alzheimerkranken zum Einsatz kommen. Der Chip befände sich dabei nicht direkt im Gehirn, sondern im Schädel, und würde mit dem Gehirn über zwei Elektrodenraster an den Ein- und Ausgängen der geschädigten Hippocampusregion kommunizieren. Auf der einen Seite würde die eingehende elektrische Aktivität gemessen und auf der anderen die entsprechende Antwort ans Gehirn gesendet.

Ebenfalls modelliert und simuliert wird der olivocerebellare Trakt, der die Verantwortung für Gleichgewicht und Koordination der Glieder trägt. Hinter diesem Vorhaben steht eine internationale Forschergruppe mit dem Ziel, einen künstlichen olivocerebellaren Trakt für Roboter mit militärischer Anwendung oder zur Assistenz von behinderten Menschen zu entwickeln.¹¹⁰ Einer der Gründe, dass sie sich für diesen Teil des Gehirns entschieden, war, „dass er in allen Wirbeltieren vorhanden ist – er sieht überall ungefähr gleich aus, von den einfachsten bis zu den komplexesten Gehirnen“, so Rodolfo Llinas, Neurowissenschaftler an der New York University Medical School und Mitglied besagter Gruppe. „Die Annahme ist, dass er [gegen evolutionäre Veränderungen] konserviert ist, weil er eine sehr intelligente Lösung darstellt. Da das System an der motorischen Koordination beteiligt ist – und wir eine Maschine mit anspruchsvoller Motorik bauen wollen – fiel die Wahl [des zu modellierenden Systems] nicht schwer.“

Einer der einzigartigen Aspekte ihres Simulators ist, dass er auf analogen Schaltungen beruht. Ähnlich wie bei Carver Meads Pionierarbeit mit analogen Gehirnsimulationen konnte auch hier mithilfe von Transistoren im Analogmodus eine deutlich höhere Leistung mit viel weniger Komponenten erzielt werden.

Ferdinando Mussa-Ivaldi (Northwestern University), ein anderer Forscher aus dem Team, über den Nutzen eines künstlichen olivocerebellaren Trakts für behinderte Menschen: „Denken sie an Lähmungspatienten. Viele Alltagsaufgaben – ein Glas Wasser holen, Anziehen, Ausziehen, in den Rollstuhl heben – können Roboterassistenten ausführen, und dem Patienten somit mehr Unabhängigkeit verschaffen.“

Höhere Funktionen: Imitation, Vorhersage und Emotionen

Denkoperationen sind wie Kavallerieeinsätze in einer Schlacht – ein kostspieliges Manöver, das frische Pferde erfordert und nur in entscheidenden Momenten durchgeführt werden sollte.

ALFRED NORTH WHITEHEAD

Doch was menschliche Intelligenz auszeichnet, ist nicht, was sie tut, wenn sie funktioniert, sondern was sie tut, wenn sie nicht weiter kommt.

MARVIN MINSKY

Wenn Liebe die Antwort ist, könnten Sie dann bitte die Frage anders formulieren?

LILY TOMLIN

Die Großhirnrinde befindet sich an der Spitze der neuronalen Hierarchie und ist daher der am wenigsten verstandene Teil des Gehirns. Sie besteht aus sechs dünnen Schichten am äußersten Rand der beiden Gehirnhälften und enthält Milliarden von Nervenzellen. Laut Thomas M. Barol Jr. vom Computational Neurobiology Laboratory des Salk Institute for Biological Studies kann „ein einziger Kubikmillimeter der Großhirnrinde [...] um die fünf Milliarden [...] Synapsen verschiedener Form und Größe enthalten.“ Die Hirnrinde ist verantwortlich für Wahrnehmung, Planung, Entscheidungen – und zu einem großen Teil für das, was wir als bewusstes Denken bezeichnen.

Ein weiteres einzigartiges Attribut unserer Spezies, nämlich unsere Fähigkeit zur Sprache, scheint ebenfalls in diesem Teil des Gehirns verankert zu sein. Nur wenige Primaten, darunter Affen und Menschen, sind fähig, Aufgaben mithilfe eines Spiegels zu bewältigen, was auf einen entscheidenden Evolutionsschritt hindeutet, der auch der Ursprung der

Sprache sein könnte. Giacomo Rizzolatti und Michael Arbib vermuten, dass sich Sprache aus manuellen Gesten entwickelte (wozu ebenfalls Affen – und natürlich Menschen – in der Lage sind). Um Gestikulieren zu können, muss der Zusammenhang zwischen Ausführung und visueller Wirkung der eigenen Handbewegungen klar sein.¹¹¹ Die „Spiegelhypothese“^{*} der beiden Theoretiker besagt, dass der Schlüssel zur Entwicklung von Sprache in der sogenannten „Parität“ besteht: dem Konzept, dass eine Geste für denjenigen, der sie ausführt, und jemanden, der sie beobachtet, dieselbe Bedeutung hat – in anderen Worten: das Verständnis, dass das, was wir im Spiegel sehen, dem entspricht, was jemand sieht, der uns beobachtet. Die meisten Tiere sind nicht fähig, ihr Spiegelbild in dieser Weise zu interpretieren, und man vermutet, dass sie darum keine Parität herstellen können.

Eine eng verwandte Theorie ist, dass die Fähigkeit Bewegungen zu imitieren (oder Laute, im Fall von menschlichen Kleinkindern) für die Entwicklung von Sprache entscheidend ist.¹¹² Imitation setzt voraus, beobachtete Vorgänge zu zergliedern und sich die einzelnen Teile durch rekursives und wiederholtes Üben anzueignen.

Rekursion ist der Dreh- und Angelpunkt einer neuen linguistischen Theorie. Noam Chomsky führte in seinen frühen Arbeiten noch eine Vielzahl von Attributen an, die allen menschlichen Sprachen gemeinsam sind. Eine Veröffentlichung von Marc Hauser, Noam Chomsky und Tecumseh Fitch aus dem Jahre 2002 macht dagegen „Rekursion“ allein für die einzigartigen sprachlichen Fähigkeiten des Menschen verantwortlich.¹¹³ Rekursion ist die Fähigkeit, kleinere Teile zu größeren Komplexen zusammenzusetzen und diese wiederum zu noch größeren Strukturen zu kombinieren und so weiter – und diesen Prozess beliebig oft zu wiederholen. Auf diese Weise bilden wir komplexe Satzstrukturen und Texte aus einer endlichen Menge von Wörtern.

Eine weitere entscheidende Fähigkeit des Gehirns besteht darin, Vorhersagen zu machen, unter anderem über die Konsequenzen der eigenen Entscheidungen und Handlungen. Manche Wissenschaftler vermuten, dass dies die Hauptfunktion der Großhirnrinde ist, allerdings spielt das Kleinhirn eine wichtige Rolle bei der Vorhersage von Bewegungen.

Interessanterweise sind wir auch fähig, unsere eigenen Entscheidungen vorherzusehen. Benjamin Libet, Professor für Physiologie an der University of California in Davis, zeigte, dass neuronale Aktivitäten, die eine bestimmte Handlung einleiten, bereits etwa eine Drittel Sekunde, bevor sich das Gehirn für besagte Handlung entscheidet, auftreten. Daraus folgt, so Libet, dass die Entscheidung lediglich eine Illusion ist und „das Bewusstsein dabei außen vor bleibt“. Der Kognitionswissenschaftler und Philosoph Daniel Dennett beschreibt dieses Phänomen folgendermaßen: „In irgendeinem Gehirnbereich wird die Handlung angezettelt und die Signale an die Muskeln werden auf den Weg gebracht, und zwischendurch wird Ihnen, dem bewussten Selbst, ganz nebenbei mitgeteilt, was vor sich geht. (Ganz nach Manier guter Staatsdiener belässt man Sie, den blauäugigen Präsidenten, dabei in dem Glauben, alle Fäden in der Hand zu halten).“¹¹⁴

In einem anderen Experiment stimulierten Neurophysiologen gezielt Punkte im Gehirn, um bestimmte Emotionen auszulösen. Die Versuchspersonen fanden stets sogleich rationale Erklärungen für ihre Gefühlsregungen. Seit Jahren bekannt ist auch, dass bei Patienten, deren linke und rechte Gehirnhälfte nicht mehr verbunden sind, die eine Hälfte (meist die verbaler veranlagte linke Seite) Erklärungen („Konfabulationen“) für die Handlungen der anderen Hälfte erfindet, als wäre die linke Seite eine Art Pressesprecher für die rechte Seite.

Die komplexeste Fähigkeit – das Glanzstück, wie ich finde – des menschlichen Gehirns, ist unsere emotionale Intelligenz. An der Spitze der komplexen und verschlungenen Hierarchie der Gehirnfunktionen steht unter anderem unsere Fähigkeit, Gefühle zu empfinden und uns entsprechend zu verhalten, mit sozialen Situationen umzugehen, ein Moralempfinden zu haben, über einen Witz zu lachen und emotional auf Kunst und Musik zu reagieren. Niedrigere Gehirnfunktionen spielen selbstverständlich in die emotionalen Gehirnprozesse mit hinein – und gerade beginnen wir, die dafür verantwortlichen Gehirnbereiche und Zellarten zu verstehen und zu modellieren.

Diese Überlegungen zielen alle auf die Frage, wie sich das Gehirn des Menschen von dem anderer Säugetiere unterscheidet. Die Antwort lautet, die Unterschiede sind klein, aber entscheidend – und sie zeigen uns, wie das

Gehirn Emotionen und andere Empfindungen verarbeitet. Ein Unterschied ist die deutlich größere Hirnrinde beim Menschen, was sich in unserer Überlegenheit bei Planung, Entscheidungsfindung und anderen Formen analytischen Denkens widerspiegelt. Eine weitere Charakteristik ist, dass bei Menschen emotionsgeladene Situationen durch spezielle sogenannte Spindelneuronen gehandhabt werden, welche nur bei Menschen und manchen Menschenaffen vorkommen. Diese Zellen sind groß und haben lange Filamente, sogenannte „apikale Dendriten“, welche zahlreiche Signale aus vielen Gehirnregionen sammeln. Je höher die Sprosse der Evolutionsleiter, desto häufiger begegnet man solchen Formen von „tiefer“ neuronaler Verknüpfung, bei der bestimmte Neuronen zahlreiche Gehirnbereiche verbinden. Angesichts der Komplexität unserer emotionalen Reaktionen ist es geradezu naheliegend, dass die daran beteiligten Nervenzellen eine ebensolche tiefe Verknüpfung aufweisen.

Was dagegen überrascht, ist, wie wenige Spindelneuronen es nur gibt: etwa 80.000 im ganzen Gehirn, 45.000 davon in der rechten Hälfte, 35.000 in der linken. Dieses leichte Ungleichgewicht erklärt möglicherweise die verbreitete Sichtweise, dass die rechte Gehirnhälfte das Zentrum der emotionalen Intelligenz ist. Gorillas haben etwa 16.000 solcher Zellen, Bonobos etwa 2.100 und Schimpansen etwa 1.800. Bei anderen Säugetieren kommen sie überhaupt nicht vor.

Dr. Arthur Craig (Barrow Neurological Institute in Phoenix) hat den Aufbau von Spindelneuronen beschrieben.¹¹⁵ Doch lässt uns das Nervensystem vom anderen Ende her aufrollen. Das untere Rückenmark empfängt Nervensignale aus dem ganzen Körper, beispielsweise von der Haut, den Muskeln und den Organen – insgesamt etwa hundert Megabit pro Sekunde. Darunter befinden sich Informationen über Tastreize, Temperatur, Säuregehalte (etwa Laktatwerte der Muskeln), Verdauungsvorgänge und so weiter. Diese Daten werden im Hirnstamm verarbeitet und Nervenzellen der sogenannten Lamina-1-Schicht erstellen eine Art Radarkarte des aktuellen Körperzustands.

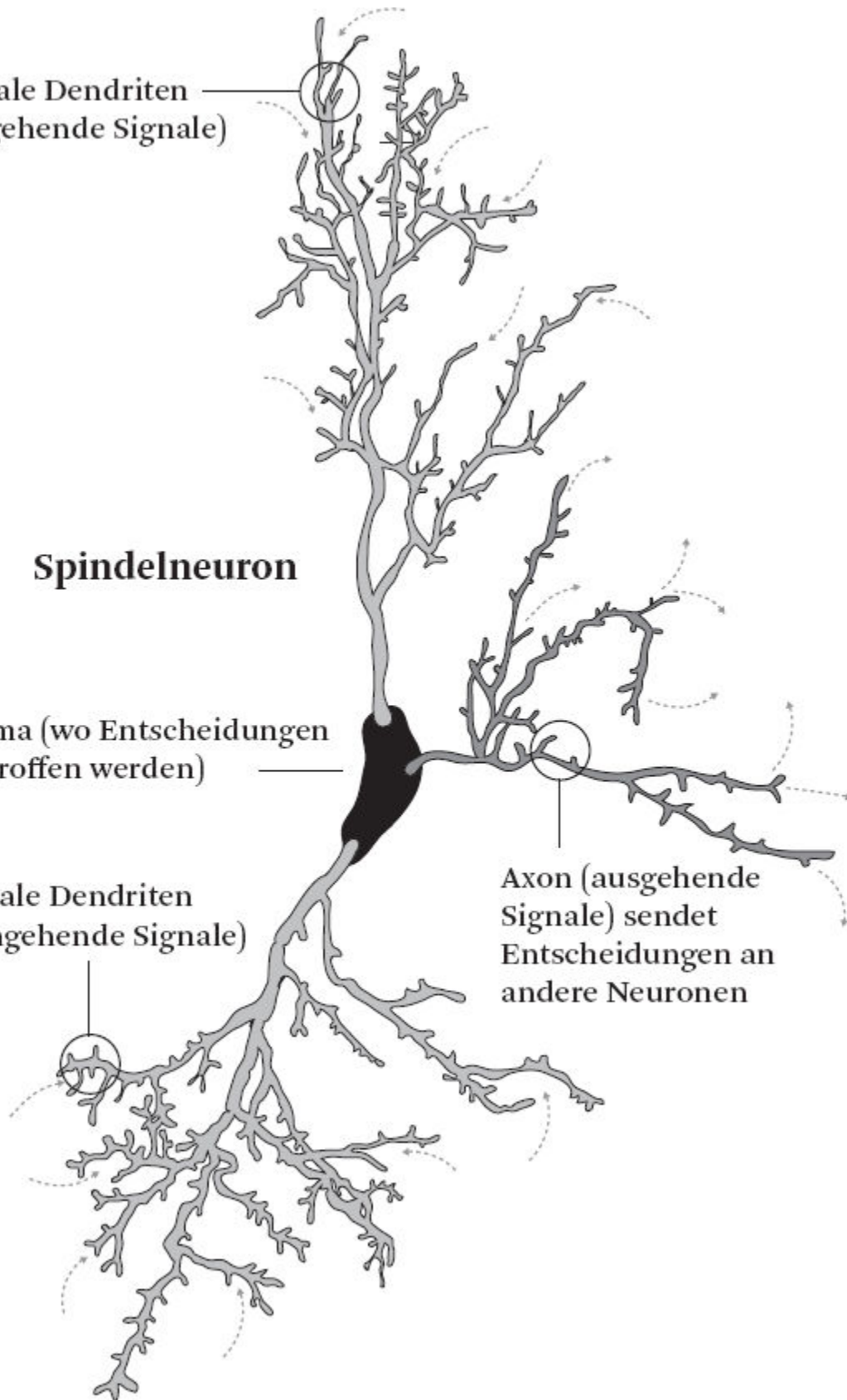
Apikale Dendriten
(eingehende Signale)

Spindelneuron

Soma (wo Entscheidungen
getroffen werden)

Basale Dendriten
(eingehende Signale)

Axon (ausgehende
Signale) sendet
Entscheidungen an
andere Neuronen



Dann durchlaufen die Informationen den sogenannten unteren ventromedialen Nucleus (uVMN), einen etwa nussgroßen Gehirnteil, der komplexere Reaktionen auf Körperzustände zu berechnen scheint, etwa: „Das schmeckt grauenhaft“ oder „Dieser Ort stinkt“ oder „Diese Berührung ist angenehm“. Die zunehmend strukturierten Informationen erreichen schließlich die sogenannten Inselrinden: zwei Bereiche der Hirnrinde im Schläfenbereich, etwa so groß wie ein kleiner Finger. Craig bezeichnet den uVMN und die Inselrinden als „ein System, das die Substanz Ich darstellt.“

Die genauen Mechanismen sind noch nicht erforscht, doch diese Bereiche sind offenbar kritisch für Bewusstsein und Emotionen. Bei anderen Tieren sind sie deutlich weniger ausgeprägt als bei Menschen. Der uVMN von Makaken ist beispielsweise so groß wie ein Sandkorn, und bei niederen Tierarten ist er noch kleiner. Diese Befunde stehen im Einklang mit dem zunehmenden Konsens, dass Emotionen stark mit Gehirnbereichen verknüpft sind, die Körperkarten enthalten – diesen Standpunkt vertritt unter anderem Dr. Antonio Damasio (University of Iowa).¹¹⁶ Sie passen auch gut in das Bild, dass sich der Großteil unseres Denkens mit unserem Körper befasst – damit, ihn zu beschützen und zu verbessern und seine zahllosen Bedürfnisse und Begehren zu erfüllen.

Kürzlich wurde noch eine weitere Verarbeitungsebene der sensorischen Informationen entdeckt. Von den beiden Inselrinden gelangen Daten in einen kleinen Bereich vor der rechten Inselrinde, den sogenannten frontoinsularen Kortex. Dort schließlich befinden sich die Spindelneuronen, und fMRI-Aufnahmen haben gezeigt, dass dieser Bereich besonders aktiv ist, wenn wir starke Emotionen erleben: etwa Liebe, Wut, Trauer oder sexuelles Verlangen. Spindelneuronen beginnen beispielsweise stark zu feuern, wenn die Versuchsperson ihre(n) Geliebte(n) erblickt oder ihr/sein Kind schreien hört.

Anthropologen glauben, dass Spindelneuronen erstmals vor zehn bis fünfzehn Millionen Jahren bei den immer noch unbekannten gemeinsamen Vorfahren von Affen und Menschen auftraten, und dass ihre Anzahl vor etwa hunderttausend Jahren rasch zunahm. Neugeborene besitzen übrigens keine Spindelneuronen: Die Zellen tauchen erst im Alter von etwa fünf Monaten auf und vermehren sich vor allem zwischen dem ersten und dritten

Lebensjahr. Etwa in diesem Zeitraum entwickelt sich auch die Fähigkeit, mit moralischen Problemen umzugehen und höhere Emotionen wie Liebe zu empfinden.

Der große Einfluss der Spindelneuronen beruht auf der tiefen Verknüpfung mit vielen anderen Gehirnbereichen durch ihre langen „apikalen Dendriten“. Die in den Spindelneuronen verarbeiteten höheren Emotionen werden daher durch unseren kompletten Wahrnehmungs- und Kognitionsapparat beeinflusst. Ein exaktes Reverse Engineering der Funktion dieser Zellen gestaltet sich daher als schwierig, solange wir keine besseren Modelle all der Areale haben, mit denen sie in Verbindung stehen. Bemerkenswert ist aber, wie wenige Neuronen exklusiv mit Emotionen befasst zu sein scheinen. Wir haben fünfzig Milliarden Zellen im Kleinhirn für das Erlernen von Bewegungsabläufen, Milliarden in der Hirnrinde für Wahrnehmung und rationales Planen, aber gerade mal achtzig Tausend Spindelneuronen für höhere Gefühlsebenen. Es sei angemerkt, dass Spindelneuronen keine rationale Problemlösung betreiben, weshalb wir auch nicht rational steuern können, wie wir Musik erleben oder wann wir uns verlieben. Der Rest des Gehirns ist dagegen schwer beschäftigt, sich einen Reim auf unsere rätselhaften Emotionen zu machen.

Die Gehirn-Maschinen-Schnittsstelle

Ich will etwas anfangen mit meinem Leben; ich will ein Cyborg werden.

KEVIN WARWICK

Ein besseres Verständnis des menschlichen Gehirns wird uns helfen, ähnliche, biologisch inspirierte Maschine zu entwickeln, und uns zudem ermöglichen, unser Gehirn an Computer anzuschließen. In den folgenden Jahren wird es, wie ich glaube, zu einer immer engeren Verschmelzung kommen.

Die Defense Advanced Research Projects Agency steckt jährlich bereits \$24 Millionen in die Erforschung von Gehirn-Computer-Schnittstellen. Wie zuvor beschrieben (siehe den Abschnitt „Das visuelle System“ auf [Seite](#)

185) versuchen Tomaso Poggio und James DiCarlo (MIT), ebenso wie Christof Koch (California Institute of Technology, kurz: „Caltech“), zu modellieren, wie das Gehirn visuelle Objekte erkennt und diese Information kodiert. Durch solche Forschungen könnte es eines Tages möglich werden, Bilder direkt in das Gehirn zu übertragen.

Miguel Nicolelis und seine Mitarbeiter (Duke University) verpflanzten Sensoren in Affenhirne, wodurch die Tiere allein kraft ihrer Gedanken einen Roboterarm steuern konnten. In einem ersten Schritt lernten die Affen, einen Mauszeiger per Joystick zu bewegen. Dabei sammelten die Wissenschaftler per EEG Gehirnsignale und stellten das System so um, dass der Zeiger nicht mehr auf den Joystick, sondern auf die entsprechenden Signalmuster im Gehirn der Affen reagierte. Die Affen lernten schnell, dass der Joystick nun nutzlos war und sie den Zeiger durch ihre Gedanken steuern konnten. Dieses „Gedankenerkennungssystem“ wurde dann an einen Roboter angeschlossen; die Affen lernten, auch die Bewegungen des Roboters mit ihren Gedanken zu kontrollieren. Mithilfe von visuellem Feedback über die Aktionen des Roboters erlangten sie völlige Kontrolle über den Roboter. Das endgültige Forschungsziel sind vergleichbare Systeme für gelähmte Menschen.

Ein Problem von Neuroimplantaten ist, dass das Nervengewebe Fremdkörper in Gliazellen einzuhüllen pflegt, um das Gehirn zu schützen. Ted Berger und seine Kollegen entwickeln darum spezielle, biologisch erscheinende Ummantelungen, welche Nervenzellen anziehen, anstatt sie abzuschrecken.

Einen anderen Ansatz verfolgt das Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in München. Dort versucht man, Nerven und Elektronik direkt zu verdrahten. Ein von Infineon entwickelter Chip lässt Neuronen direkt auf einer speziellen Oberfläche anwachsen, die einen direkten Kontakt zwischen Nerven und elektrischen Sensoren und Stimulatoren herstellt. Das Caltech arbeitet ebenfalls an „Neurochips“ und demonstrierte bidirektionale, nichtinvasive Kommunikation zwischen Neuronen und Elektronik.¹¹⁷

Es gibt erste Erfahrungen mit chirurgisch platzierten Neuroimplantaten. Nach dem Einfügen von Innenohrimplantaten reorganisiert sich das

auditorische System automatisch, um das mehrkanalige Signal des Implantats korrekt zu interpretieren. Ein ähnlicher Prozess ist bei den tief im Gehirn sitzenden Implantaten für Parkinsonpatienten zu beobachten. Diese Geräte haben eine FDA-Genehmigung und senden Signale an die Nervenzellen in der direkten Umgebung, welche genauso reagieren, als kämen die Signale von den durch die Krankheit geschädigten Neuronen. Mit neueren Versionen des Geräts können Softwareupgrades von außen direkt in das Implantat überspielt werden.

Ein Reverse Engineering des Gehirns – mit wachsendem Tempo

Homo sapiens, die erste wirklich freie Spezies, ist drauf und dran die natürliche Selektion, durch die wir entstanden sind, außer Kraft zu setzen. [...] [B]ald müssen wir in uns gehen und entscheiden, was wir werden wollen.

E. O. WILSON, *CONSILIENCE: THE UNITY OF KNOWLEDGE*, 1998

Wir wissen wohl, was wir sind, aber nicht, was wir werden können.

WILLIAM SHAKESPEARE

Am wichtigsten ist, jederzeit bereit zu sein, das, was wir sind, für das, was wir werden können, zu opfern.

CHARLES DUBOIS

Gelegentlich wird die Besorgnis geäußert, dass wir mit dem Feuer spielen und nicht wissen, welche empfindlichen Gleichgewichte wir stören, wenn wir Modelle, Simulationen und Erweiterungen des menschlichen Gehirns entwickeln. W. French Anderson schreibt:

Vielleicht sind wir nicht besser als ein kleiner Junge, der gerne Sachen auseinandernimmt. Schlau genug um eine Armbanduhr in Einzelteile zu zerlegen, vielleicht sogar schlau genug sie wieder zusammenzubauen. Aber was passiert, wenn der kleine Junge probiert, die Uhr „besser zu machen“? [...] Er versteht nur, was er sieht, und weiß nichts von den präzisen Kalkulationen, welche die exakte Stärke jeder einzelnen Feder bestimmen. [...] Seine Verbesserungsversuche würden wahrscheinlich nur Schaden anrichten. [...] Ich befürchte [...], dass auch wir nicht wirklich verstehen, was die [Menschenleben], an denen wir herumbasteln, am Ticken hält.¹¹⁸

Doch damit tut Anderson den Bemühungen von Zehntausenden Neuro- und Computerwissenschaftlern unrecht, welche die Möglichkeiten und Grenzen ihrer Modelle und Simulationen systematisch ausloten, bevor sie den nächsten Schritt tun. Keinesfalls zerlegen wir das Gehirn in seine Billionen von Komponenten, um es ohne eine exakte Analyse jedes einzelnen Handgriffs wieder zusammenzupuzzeln. Das Verständnis des Gehirns ist ein Prozess, der eine lange Reihe immer besserer Modelle – auf Basis immer akkuraterer Daten – durchläuft.

Bald reicht die Rechenleistung von Computern aus, um das Gehirn zu emulieren – unsere Supercomputer sind fast soweit. Indes beschleunigt sich auch die Entwicklung von Methoden zur Abbildung und Messung des Gehirns sowie von entsprechenden Modellen und Simulationen. Wie bei allen anderen Projektionen in diesem Buch, ist es auch hier wichtig, sich die exponentielle Natur dieser Entwicklung vor Augen zu halten. Immer wieder treffe ich auf Kollegen, die der Meinung sind, dass es noch ein Jahrhundert oder länger dauert, bis wir das Gehirn völlig durchschaut haben. Wie so oft beruht diese Einschätzung auf einer linearen Betrachtung der Zukunft und verkennt die inhärente Beschleunigung des Fortschritts sowie das exponentielle Wachstum der einzelnen zugrunde liegenden Technikbereiche. Zudem unterschätzen auch selbst auf dem Gebiet tätige Fachleute häufig die volle Tragweite der vielfältigen zeitgenössischen Errungenschaften.

Die räumliche und zeitliche Auflösung der Scan- und Messtechnik verdoppelt sich jährlich. Bandbreite, Preis-Leistungs-Verhältnis und Geschwindigkeit der Bildrekonstruktion von Gehirnscannern zeigt vergleichbares exponentielles Wachstum. Das gilt für alle Arten von Scans: komplett nichtinvasive Verfahren, in vivo Untersuchungen bei offener Schädeldecke und destruktive Methoden. Der Umfang von Datenbanken für Gehirndaten und -modelle verdoppelt sich ebenfalls etwa einmal jährlich.

Die Wissenschaft hat sich als fähig erwiesen, detaillierte Modelle und funktionsfähige Simulationen von subneuronalen Komponenten, Neuronen und umfangreichen neuronalen Netzen zu erstellen, sobald die nötigen Werkzeuge und Daten vorhanden sind. Das Verhalten von Neuronen und subneuronalen Komponenten ist oft ziemlich komplex und in vielerlei

Hinsicht nichtlinear, während neuronale Netze meist einfacher zu beschreiben sind als ihre einzelnen Knoten. Dank immer besserer, effizient implementierter mathematischer Werkzeuge ist es uns möglich, solcherlei komplexe, hierarchische, adaptive, halbzufällige, selbstorganisierende, nichtlineare Systeme zu modellieren. Davon zeugen unsere bisherigen Erfolge bei der Modellierung wichtiger Gehirnregionen.

Die derzeit auf dem Weg befindliche Generation bildgebender Verfahren wird erstmals über die räumliche und zeitliche Auflösung verfügen, um Echtzeitaufnahmen einzelner Dendriten, Dornfortsätze und Synapsen zu liefern. Die nächste Generation entsprechend höher aufgelöster Modelle und Simulationen wird nicht lange auf sich warten lassen.

Im Zuge der Nanobot-Ära in den 2020ern wird es uns schließlich möglich sein, das Gehirn aufs Genaueste von innen zu untersuchen – mittels nichtinvasiver, ganzheitlicher Gehirnschans in Echtzeit, durch Milliarden von Nanobots, die durch die Kapillaren strömen. Wir haben mit den bisherigen schlichten Mitteln bereits Außerordentliches geleistet – und in zwanzig Jahren werden wir über Millionen Mal mehr Computerleistung und deutlich bessere Aufnahmetechniken und höhere Bandbreite verfügen. Darum können wir davon ausgehen, dass in den 2020ern die Technik reif sein wird, das gesamte Gehirn zu modellieren und zu simulieren. Dadurch wird menschliche Intelligenz mit anderen Formen intelligenter Berechnungen kombiniert und kann von den inhärenten Vorzügen profitieren, die Maschinen aufweisen, wenn es darum geht, große Informationsmengen zu speichern, abzurufen und schnell untereinander auszutauschen. Diese machtvollen Hybridsysteme können wir auf Kommunikationsplattformen implementieren, die weit mehr Möglichkeiten bieten als die recht unflexible Architektur des biologischen Gehirns.

Skalierbarkeit* menschlicher Intelligenz. Hofstadter zweifelte, ob die menschliche Intelligenz die nötige Schwelle erreicht, um sich selbst zu verstehen. Dem können wir entgegen: Der immer schnellere Fortschritt des Reverse Engineering des Gehirns zeigt deutlich, dass uns nichts davon abhält, unser eigenes Denken – und alles andere – zu begreifen. Der Schlüssel zur Skalierbarkeit der menschlichen Intelligenz ist unsere

Fähigkeit, im Geiste Modelle der Realität zu erstellen. Diese Modelle können rekursiv sein, also weitere Modelle enthalten, welche wiederum noch feinere Modelle enthalten; der Verschachtelung sind keine Grenzen gesetzt. Ein Modell einer biologischen Zelle kann beispielsweise Modelle des Zellkerns, der Ribosomen und anderer Zellorganellen umfassen. Ein Ribosomenmodell wiederum kann Modelle submolekularer Komponenten enthalten – und so weiter, über Atome bis zu den Elementarteilchen.

Unser Verständnis komplexer Systeme ist aber nicht unbedingt hierarchisch. Ein komplexes System wie eine Zelle oder das Gehirn lässt sich nicht allein durch Zergliederung in Teilsysteme und deren Komponenten erfassen. Mithilfe immer besserer mathematischer Werkzeuge können wir jedoch auch Systeme beschreiben, die – so wie Zellen und Gehirne – Ordnung und Chaos vereinen, und die komplexen Zusammenhänge verstehen, an denen ein bloßes logisches Zergliedern scheitern muss.

Entscheidend ist auch unsere sich ebenfalls immer weiter verbessernde Computertechnik, die uns ermöglicht, immer komplexere Modelle zu handhaben, die wir uns im Kopf alleine nicht vorstellen könnten. Wären unsere Modelle auf das beschränkt, was wir uns im Kopf vorstellen können, so wären Hofstadters Zweifel sicher berechtigt. Die Schwelle des Selbst-Verstehens überschreiten wir mithilfe der Kombination unserer angeborenen Fähigkeiten mit unseren Werkzeugen, die es uns ermöglichen, abstrakte – und immer genauere – Modelle der beobachtbaren Welt zu entwickeln, zu verfeinern, zu erweitern und zu verändern.

Gehirn-Upload

Zum Fantasieprodukt eines Computers werden.

DAVID VICTOR DE TRANSEND, *GODLING'S GLOSSARY*, DEFINITION VON „UPLOAD“

Etwas strittiger als die Erforschung des Gehirns ist das *Hochladen eines Gehirns*. Gehirn-Upload bedeutet, ein Gehirn bis ins letzte Detail zu scannen und in einem anderen geeigneten Medium nachzubilden. Dadurch

würden die Persönlichkeit und sämtliche Erinnerungen und Fähigkeiten einer Person erfasst.

Um wirklich die mentalen Prozesse einer Person zu erfassen, müssen wir dem nachgebauten Geist auch einen Körper geben, da sich unser Denken zu großen Teilen um körperliche Bedürfnisse dreht. Zu dem Zeitpunkt, zu dem es möglich ist, menschliche Gehirne zu erfassen und nachzubilden, werden (wie wir in **Kapitel 5** sehen werden) biologische und nichtbiologische Menschen auf ein Sortiment von Körpern – im Sinne des einundzwanzigsten Jahrhunderts – zurückgreifen können. Der menschliche Körper 2.0, das sind sowohl virtuelle Körper in komplett realistischen virtuellen Umgebungen als auch auf Nanotechnik basierende physische Körper.

In **Kapitel 3** habe ich Schätzungen für die Hardware-Anforderungen einer Simulation des menschlichen Gehirns abgegeben. Während für eine Emulation menschlicher Intelligenz 10^{16} cps und 10^{13} Bits Speicher ausreichen dürften, sind die Anforderungen für einen Upload höher: 10^{19} cps beziehungsweise 10^{18} Bits. Die erste Schätzung bezieht sich auf die Nachbildung der Funktion von Gehirnregionen; die zweite, höhere Schätzung bezieht sich auf eine exakte Reproduktion sämtlicher Details der ungefähr 10^{11} Neuronen und 10^{14} Verknüpfungen. Uploads werden, sobald sie möglich sind, vermutlich auf Hybridlösungen hinauslaufen, beispielsweise bestimmte Grundfunktionen wie die sensorische Signalverarbeitung funktional emulieren (durch Standardmodule) und die Erfassung subneuronaler Details auf Regionen beschränken, die wirklich für individuelle Persönlichkeit und Fähigkeiten verantwortlich sind. Dennoch legen wir für die folgenden Überlegungen unverändert die höhere Schätzung zugrunde.

Die nötige Hardware (mit 10^{19} cps und 10^{18} Bits) wird in den frühen 2030ern für eintausend Dollar verfügbar sein. Doch auch an die Scantechnik stellen Uploads höhere Anforderungen als es die „bloße“ Reproduktion der intellektuellen Leistungen des Gehirns tut. Theoretisch könnte man ein Gehirn uploaden, ohne zu wissen, wie es funktioniert, einfach, indem man es bis ins winzigste Detail abbildet. Die Praxis sieht aber höchstwahrscheinlich anders aus. Wenn wir die Arbeitsweise des

Gehirns verstehen, werden wir auch erkennen, welche Details wichtig sind und welche vernachlässigt werden können. Wir müssen beispielsweise wissen, welche Moleküle eines Neurotransmitters entscheidend sind und ob Konzentration, Position, Ausrichtung und molekularer Zustand eine Rolle spielen. Wie zuvor besprochen, wissen wir zum Beispiel erst seit Kurzem, dass der Schlüssel zur Erinnerungsspeicherung in der Position von Aktinmolekülen und dem Zustand von CPEB-Molekülen in der Synapse besteht. Wir können unmöglich alle kritischen Details bestimmen, bevor wir über eine gesicherte Theorie der Funktionsweise des Gehirns verfügen. Die Bestätigung einer solchen Theorie wird die Form einer funktionalen Simulation menschlicher Intelligenz haben, welche den Turing-Test besteht – was, wie ich glaube, bis 2029 zu erwarten ist.¹¹⁹

Die nötige Auflösung erreichen erst Gehirnaufnahmen von innen durch Nanobots. Die entsprechende Technik wird Ende der 2020er verfügbar sein, weshalb wir vernünftigerweise in den frühen 2030ern mit für Uploads ausreichender Rechenleistung, Speicherkapazität und Scantechnik rechnen dürfen. Wie jede andere Technik wird auch Gehirn-Uploading bis zur Ausreifung eine Reihe von Verbesserungsschritten durchlaufen müssen, weshalb wir konservativ annehmen, dass Ende der 2030er erfolgreiche Uploads möglich sind.

Es sei angemerkt, dass das Gehirn zwar der hauptsächliche, aber nicht der einzige Sitz persönlicher Eigenschaften und Fähigkeiten ist. Unser Nervensystem erstreckt sich durch den ganzen Körper, und auch das endokrine System (der Hormonhaushalt) spielt hier eine Rolle. Den größten Teil des Nervensystems und dessen Komplexität macht jedoch das Gehirn aus. Die Informationsbandbreite des endokrinen Systems ist relativ gering, da lediglich die Hormonkonzentrationen entscheidend sind, nicht die exakte Position einzelner Hormonmoleküle.

Einen erfolgreichen Upload bestätigt der „Ray-Kurzweil“- oder „Jane-Smith“-Turing-Test: Ein menschlicher Gutachter muss überzeugt werden, dass der Upload von der natürlichen Person nicht unterscheidbar ist. Doch zum fraglichen Zeitpunkt werden wir Schwierigkeiten haben, Regeln für jedwede Art von Turing-Tests abzustecken: Da nichtbiologische Intelligenz den ursprünglichen Turing-Test bereits Jahre zuvor (gegen 2029) bestanden

haben wird, stellt sich die Frage, ob nichtbiologische Menschen als Gutachter zulässig sind. Und wie sieht es mit technisch verbesserten Menschen aus? Nicht verbesserte Menschen könnten schwer aufzutreiben sein. Auch die Definition von „verbessert“ dürfte sich als problematisch erweisen, da es, zu einem Zeitpunkt, an dem Uploads möglich sind, viele verschiedene Spielarten und Ebenen erweiterter biologischer Intelligenz geben wird. Ebenso werden auch die hochzuladenden Menschen nicht auf ihre biologische Intelligenz beschränkt sein – der Upload des nichtbiologischen Anteils sollte jedoch kein Problem darstellen, da einfache Kopierbarkeit maschineller Intelligenz zu den klassischen Vorzügen von Computersystemen gehört.

Eine praktische Frage, die sich stellt, lautet: Wie schnell müssen wir das Nervensystem einer Person erfassen? Ein unmittelbarer Schnappschuss ist natürlich nicht möglich – selbst wenn wir einen Nanobot für jedes Neuron hätten, würde die Erfassung ein klein wenig Zeit brauchen. Man könnte darum einwenden, dass die hochgeladenen Informationen nicht die Person in einem bestimmten Moment, sondern über eine gewisse Zeitspanne repräsentieren – auch wenn es sich nur um Sekundenbruchteile handelt.¹²⁰ Dieser Umstand ist jedoch einem erfolgreichen „Jane-Smith“-Turing-Test nicht abträglich. Im Alltag erkennen wir einander schließlich auch wieder, selbst wenn wir uns Tage oder Wochen nicht gesehen haben. Ein Abbild des Zustands einer Person, welches, im Rahmen der natürlichen Veränderungen, die eine Person innerhalb weniger Sekunden oder Minuten durchläuft, akkurat ist, dürfte für jeden erdenklichen Zweck ausreichen. Roger Penroses Theorie vom Zusammenhang zwischen Bewusstsein und quantenmechanischer Berechnung wurde zum Teil dahin gehend interpretiert, dass ein Gehirn-Upload unmöglich ist, da der „quantenmechanische Zustand“ einer Person sich während der Erfassung viele Male verändert. Dem kann ich nur entgegenen, dass sich mein quantenmechanischer Zustand, während ich diesen Satz schrieb, ebenfalls oftmals geändert hat, und trotzdem – so scheint es mir, und wer würde widersprechen? – bin ich dieselbe Person geblieben.

Nobelpreisträger Gerald Edelman weist darauf hin, dass es einen Unterschied gibt zwischen Befähigung und der Beschreibung einer

Fähigkeit. Ein Foto von einer Person ist nicht die Person, selbst wenn es sich um ein extrem scharfes, dreidimensionales „Foto“ handelt. Das Upload-Konzept ist jedoch mehr als ein Scan mit hoher Auflösung: Die Abbildung muss nicht vollkommen perfekt sein; sie muss jedoch in einem Medium realisiert werden, das zu denselben Berechnungsprozessen fähig ist, wie das „Fotomotiv“. Die neuronalen Details müssen miteinander (und mit der Außenwelt) auf dieselbe Weise interagieren, wie im abzubildenden Original. Der bloße Gehirnsan verhält sich zum hochgeladenen Verstand wie ein Computerprogramm auf einer CD-ROM (statische Abbildung) zu auf einem lauffähigen Rechner installierter Software (dynamische, interaktive Entität). Zum Upload-Szenario gehört sowohl die Erfassung der statischen Daten als auch die Erzeugung einer dynamischen Entität.

Die wichtigste Frage ist vielleicht, ob ein Upload wirklich dieselbe Person ist oder nicht. Selbst wenn der Upload einen personalisierten Turing-Test besteht und von der Kopiervorlage nicht unterscheidbar scheint, bleibt unklar, ob man es mit derselben oder einer neuen Person zu tun hat – denn möglicherweise existiert auch noch die ursprüngliche Person. Mit dieser schwerwiegenden Thematik beschäftigen wir uns in **Kapitel 7**.

Meines Erachtens ist der bedeutendste Aspekt von Gehirn-Uploads die allmähliche Übertragung unserer Intelligenz, unserer Persönlichkeit und unserer Fähigkeiten auf den nichtbiologischen Part unseres Geistes. Schon heute gibt es eine Reihe von Neuroimplantaten. In den 2020ern werden wir beginnen, unser Gehirn mithilfe von Nanobots „aufzumotzen“ – angefangen bei Routinefunktionen, wie sensorischer Signalverarbeitung und Gedächtnis, bis hin zu Lernen, Mustererkennung und logischem Denken. In den 2030ern wird der nichtbiologische Anteil unserer Intelligenz überwiegen und in den 2040ern wird er, wie wir in **Kapitel 3** gesehen haben, milliardenfach leistungsfähiger sein als der biologische Anteil. Während wir den biologischen Part wohl eine ganze Weile beibehalten werden, wird er von immer geringerer Bedeutung sein. In kleinen, unmerklichen Schritten werden wir uns irgendwann alle praktisch komplett hochgeladen haben. Es wird keinen „alten Ray“ und „neuen Ray“ geben, sondern nur einen in stetigem geistigem Wachstum begriffenen Ray. Ich glaube zwar, dass auch der hier beschriebene abrupte Scan- und

Übertragungsprozess unsere Zukunft prägen wird, doch die grundlegenden Veränderungen unserer Zivilisation werden das Ergebnis jener allmählichen aber unerbittlichen Verschiebung zu einem überlegenen nichtbiologischen Denken sein.

SIGMUND FREUD: *Über was für ein Gehirn sprechen wir hier eigentlich? Ein männliches? Ein weibliches? Das eines Kindes? Eines Genies? Oder eines geistig Behinderten? Eines „Inselbegabten“? Das Gehirn eines talentierten Künstlers oder eines Serienmörders?*

RAY: *Im Endeffekt über alle. Es geht um die allgemeinen Grundprinzipien, die hinter der menschlichen Intelligenz stecken. Aufgrund seiner Plastizität wird das Gehirn – wörtlich! – durch unser Denken „gebildet“, da unsere Gedanken neue Dornfortsätze, Synapsen, Dendriten und sogar Nervenzellen sprießen lassen. Darum waren Einsteins Parietallappen – also die Bereiche, die mit mathematischem Denken assoziiert sind – deutlich größer als gewöhnlich.¹²¹ Allerdings ist der Platz in unserem Schädel begrenzt: Einstein spielte zwar Klavier und Geige, war aber kein Spitzenmusiker. Picasso war kein großer Poet, und so weiter. Wenn wir das Gehirn reproduzieren, gelten diese Einschränkungen nicht mehr; wir müssen keine Kompromisse mehr machen.*

Dann werden wir auch unsere Unterschiede und Schwächen verstehen: Was läuft schief bei einem Serienmörder? Letzten Endes muss es am Gehirn liegen – sicher nicht an einer Magenverstimmung.

MOLLY 2004: *Aber es gibt doch nicht nur angeborene Unterschiede, oder? Was ist mit Schicksal und Erziehung?*

RAY: *Klar, das ist alles Teil des Bildes. Wir kommen mit einem Gehirn auf die Welt, das ununterbrochen lernt – von unseren ersten Worten und Schritten bis zum Chemiestudium am College.*

MARVIN MINSKY: *Natürlich spielt das Training auch für KI eine große Rolle, aber viel davon lässt sich automatisieren und beschleunigen – und wenn eine KI einmal etwas gelernt hat, kann sie ihr Wissen in Nullkommanichts an andere KIs weitergeben.*

RAY: Und KIs werden auf das exponentiell wachsende Wissen im Netz zurückgreifen können. Außerdem können sie sich in der virtuellen Netzrealität untereinander austauschen – und mit dorthin projizierten biologischen Menschen.

SIGMUND: Diese KIs haben aber keine Körper. Wie wir besprochen haben, dreht sich der größte Teil unserer Emotionen und Gedanken um unseren Körper und unsere sinnlichen und sexuellen Bedürfnisse.

RAY: Wer sagt, dass sie keine Körper haben? Wir werden die technischen Mittel sowohl für virtuelle Körper als auch für menschenartige nichtbiologische Körper haben. Darüber sprechen wir noch in **Kapitel 6**.

SIGMUND: Aber ein virtueller Körper ist kein richtiger Körper.

RAY: Die Bezeichnung „virtuell“ ist etwas unglücklich. Sie impliziert „nicht real“, aber ein virtueller Körper ist in allen relevanten Punkten ebenso real wie ein physischer Körper. Nehmen wir zum Beispiel das Telefon als auditorische virtuelle Realität. Niemand hält Stimmen am Telefon für „irreal“. Und auch mit meinem jetzigen physischen Körper spüre ich nicht direkt, wenn mich jemand in den Arm kneift; die vorverarbeiteten Signale, die mein Hirn empfängt, haben bereits die Nervenbahnen aus dem Arm, das Rückenmark und den Hirnstamm durchlaufen, bis sie schließlich in der Inselrinde ankommen. Wo wäre der Unterschied, wenn ich – oder eine KI – durch vergleichbare Signale eine virtuelle Berührung an einem virtuellen Arm spüren würde?

MARVIN: Wobei nicht alle KIs menschliche Körper brauchen werden.

RAY: Ganz richtig. Unsere menschlichen Körper und Gehirne sind – Plastizität hin oder her – von recht starrer Architektur.

MOLLY 2004: Ja, wir sind nun mal nur Menschen. Damit scheint ihr ein Problem zu haben.

RAY: Das habe ich allerdings oft. Mein Körper 1.0 hat so viele Einschränkungen, und dann muss man ihn auch noch mühsam instand halten – ganz zu schweigen von der geistigen Eingeschränktheit. Aber ich weiß die Qualitäten meines Körpers zu schätzen. Der Punkt hier

ist, dass KIs in virtuellen und realen Umgebungen Körper haben können und werden, die unserem äquivalent sind. Aber wie Marvin sagte, werden sie nicht darauf beschränkt sein.

MOLLY 2104: *Nicht nur KIs werden von den Gebrechen biologischer Körper befreit sein – biologische Menschen haben dieselben Freiheiten in realen und virtuellen Umgebungen.*

GEORGE 2048: *Wobei zwischen KI und Mensch keine klare Trennung mehr sein wird.*

MOLLY 2104: *Abgesehen von MOSHs („Mostly Original Substrate Humans“ – Menschen überwiegend natürlicher Zusammensetzung).*

KAPITEL 5

GNR

Drei ineinandergreifende Revolutionen

Auf wenigens kann die heutige Generation stolzer sein als auf die tagtäglichen, wundervollen Verbesserungen verschiedener mechanischer Apparaturen. [...] Doch was würde geschehen, wenn die Technik darin fortführe, sich sehr viel schneller zu entwickeln als das Tier- und Pflanzenreich? Würde sie uns in unserer Herrschaft über die Erde ablösen? So wie aus den Mineralen allmählich das Pflanzenreich entstand, und wie sich in ähnlicher Weise das Tier über die Pflanze erhob, so ist in den letzten Jahren ein völlig neues Reich entsprungen, von dem wir nichts kennen als das, was man eines Tages als den altertümlichen Prototypen jener Rasse betrachten wird. [...] Täglich geben wir [Maschinen] größere Kräfte und vergrößern durch allerlei geniale Erfindungen jene selbstregulierende, eigenständig handelnde Macht, die den Maschinen sein wird, was der Menschenrasse der Intellekt gewesen.

SAMUEL BUTLER, 1863 (VIER JAHRE NACH VERÖFFENTLICHUNG VON DARWINS *THE ORIGIN OF SPECIES*)

Wer wird die Nachfolge des Menschen antreten? Die Antwort lautet: Wir selbst erschaffen unsere eigenen Nachfolger. Der Mensch wird der Maschine sein, was Pferd und Hund dem Menschen sind; Maschinen sind oder werden folglich lebendig.

SAMUEL BUTLER, BRIEF VON 1863, „DARWIN AMONG THE MACHINES“¹

Die erste Hälfte des einundzwanzigsten Jahrhunderts wird von drei ineinandergreifenden Revolutionen gekennzeichnet sein: Genetik, Nanotechnik und Robotik. Sie werden die fünfte Epoche, den Beginn der Singularität, einläuten. Wir befinden uns heute in den Anfängen der Revolution „G“. Indem wir die Informationsprozesse des Lebens ergründen, lernen wir unsere Biologie zu reprogrammieren, und werden dadurch die praktische Ausrottung von Krankheiten sowie eine drastische Steigerung der menschlichen Fähigkeiten und der Lebenserwartung erreichen. Hans Moravec zufolge werden wir jedoch immer nur „Roboter zweiter Klasse“ bleiben, egal, wie viel wir an unserer DNS-basierten Biologie herumfeilen. Das soll heißen, dass die Biologie, sobald wir einmal all ihre Tricks

durchschaut haben, sich nicht mit den Schöpfungen unserer Technik messen können wird.²

Revolution „N“ wird es uns ermöglichen, unsere Körper, unsere Gehirne und unsere Umwelt Molekül für Molekül umzugestalten und neu zu erfinden – und uns weit hinter die Grenzen der Biologie zu begeben. Die heftigsten Umwälzungen bringt jedoch Revolution „R“: menschenartige Roboter, deren Intelligenz ein Abbild unserer eigenen ist – jedoch ein weitaus leistungsfähigeres. R ist die bedeutendste Veränderung, denn Intelligenz ist die stärkste „Kraft“ im Universum; einmal hoch genug entwickelt, ist sie durch nichts aufzuhalten.

Jede Revolution löst alte Probleme und schafft dafür neue. G wird uns von Krankheit und Alter erlösen, aber eine neue Bedrohung durch künstliche Designerviren mit sich bringen. Revolution N wird uns gegen jegliche Art biologischer Gefährdung wappnen, aber dafür noch viel gefährlichere, selbstreplizierende Bedrohungen schaffen. Davor wiederum kann uns R bewahren – doch was schützt uns vor pathologischer Intelligenz, die unsere eigene übersteigt? Am Ende von **Kapitel 8** werde ich eine mögliche Strategie vorstellen. Doch nun wollen wir zunächst sehen, wie die drei Revolutionen – G, N und R – zur Singularität führen.

Genetik: Die Schnittmenge aus Biologie und Informatik

Uns ist nicht entgangen, dass die von uns postulierte spezifische Paarung unmittelbar auf einen Kopiermechanismus für Erbmaterial hindeutet.

JAMES WATSON UND FRANCIS CRICK³

Nach drei Milliarden Jahren Evolution liegt uns der Befehlssatz vor, der einen jeden von der Eizelle bis ins Grab begleitet.

DR. ROBERT WATERSTON, INTERNATIONAL HUMAN GENOME SEQUENCING CONSORTIUM⁴

Hinter all den Wundern des Lebens und all dem Elend durch Krankheiten stehen Informationsprozesse, Softwareprogramme im Grunde, die

erstaunlich kompakt sind. Das gesamte menschliche Genom ist ein sequenzieller Binärcode mit nur etwa achthundert Millionen Bytes an Information. Entfernt man seine massive Redundanz durch gewöhnliche Kompressionsverfahren, bleiben gerade mal dreißig bis hundert Millionen Byte – etwa die Größe eines modernen Computerprogramms.⁵ Dieser Code wird ergänzt durch eine Reihe biochemischer Maschinen, welche die linearen (eindimensionalen) Sequenzen aus „DNS-Buchstaben“ in Ketten aus einfachen Bausteinen, den Aminosäuren, übersetzen. Diese Ketten werden wiederum zu dreidimensionalen Proteinen gefaltet, aus welchen alles Leben besteht, vom Menschen bis zum Einzeller. (Viren sind eine Grauzone zwischen lebendiger und toter Materie – sie bestehen aus DNS- und RNS-Fragmenten). Diese Maschinerie ist der selbstreplizierende Replikator, der die komplexen, hierarchischen Systeme des Lebens hervorbringt.

Der Computer des Lebens

In den frühen Phasen der Evolution waren Informationen durch die Struktur zunehmend komplexer, kohlenstoffbasierter Moleküle kodiert. Nach Milliarden von Jahren erschuf sich die Evolution einen Computer, um digitale Daten in Form von DNS-Molekülen zu speichern und zu verarbeiten. J. D. Watson und F. H. C. Crick beschrieben 1953 erstmals das DNS-Molekül als Doppelhelix aus zwei gepaarten Polynukleotidsträngen, deren Nukleotidsequenzen Informationen kodieren.⁶ Anfang dieses Jahrhunderts haben wir die Sequenzierung der menschlichen DNS abgeschlossen. Nun beginnen wir die chemischen Kommunikations- und Kontrollmechanismen zu verstehen, durch welche die DNS die Reproduktion von Zellstrukturen und komplexen Molekülen, wie der „Boten-RNS“ (auch „Messenger-RNS“: mRNA), der „Transfer-RNS“ (tRNA) und den Ribosomen, steuert.

Der Speichermechanismus ist dabei denkbar simpel. Das DNS-Molekül besteht in einem Zucker-Phosphat-Rückgrat mit mehreren Millionen „Sprossen“, die jeweils einen von vier Buchstaben tragen;

diese Sprossen der Helix kodieren jeweils zwei Bits und bilden zusammen einen eindimensionalen Digitalcode. Das Codealphabet besteht in vier Basenpaaren: Adenin-Thymin, Thymin-Adenin, Cytosin-Guanin und Guanin-Cytosin. Die DNS-Stränge einer Zelle sind insgesamt bis zu zwei Meter lang, werden jedoch in einem ausgefeilten Verfahren zusammengeknäult, sodass sie in einer zehn Mikrometer großen Zelle Platz finden.

Spezielle Enzyme kopieren die Informationen der DNS, indem sie die Basenpaare aufspalten und die beiden Stränge, Sprosse für Sprosse, um die komplementären Basen ergänzen – so entstehen zwei identische DNS-Doppelstränge. Weitere Enzyme überprüfen die Kopie, indem sie prüfen, ob wirklich alle Basenpaare komplementär sind. Auf diese Weise macht das chemische Datenverarbeitungssystem lediglich bei einem von zehn Milliarden Basenpaaren einen Fehler.⁷ Die Daten selbst sind redundant angelegt und enthalten weitere Fehlerkorrekturmaßnahmen, weshalb es durch Replikationsfehler nur selten zu signifikanten Mutationen kommt. Die meisten Fehler sind vergleichbar mit einem falschen Vorzeichen und können auf anderen Ebenen des Systems erkannt und korrigiert werden, beispielsweise durch Abgleich der Chromosomen, wodurch nennenswerter Schaden verhindert wird.⁸ Im Y-Chromosom erkennt der genetische Apparat Fehler durch Abgleich von verschiedenen Kopien eines Gens innerhalb desselben Chromosoms.⁹ In sehr seltenen Fällen aber führt ein Replikationsfehler zu einer merklichen Verbesserung, welche dann von der Evolution bevorzugt wird.

Bei der sogenannten Translation wird besagter digitaler Programmcode durch eine Reihe von Chemikalien in Proteine übersetzt – die dabei erzeugten Proteinketten bestimmen die Struktur, das Verhalten und die Intelligenz von Zellen. Zunächst werden die DNS-Knäuel durch Enzyme abschnittsweise aufgedröselt. Dann wird eine Kopie der freigelegten Basensequenz in Form eines mRNS-Strangs erstellt. Die mRNS wandert aus dem Zellkern in den Zellkörper; dort wird sie durch die Hauptakteure der biologischen Reproduktion, die Ribosomen, ausgelesen. Dabei läuft ein Teil des Ribosoms, ähnlich einer Plattenspiellernadel, über die Basensequenz der mRNS. Je drei

Buchstaben der Sequenz bilden dabei ein sogenanntes Kodon, und jedes Kodon steht für eine von zwanzig Aminosäuren (Proteinbausteine). Ein Ribosom liest also Kodon für Kodon die mRNA-Sequenz und erzeugt dann, mithilfe von tRNA, Aminosäure für Aminosäure die entsprechende Peptidkette.

Der letzte entscheidende Schritt ist das Falten der eindimensionalen Peptidkette zu einem dreidimensionalen Protein. Dieser Prozess ist bisher noch nicht am Computer simulierbar, da die Interaktionen der beteiligten Atome enorm komplex sind. Etwa zur Zeit der Veröffentlichung dieses Buches soll es erste Supercomputer geben, die über die nötige Rechenkapazität verfügen, um Proteinfaltung und Interaktionen zwischen Proteinen zu simulieren.



Proteinfaltung ist wie die Zellteilung eines der beeindruckendsten Spektakel der natürlichen Reproduktion. Spezielle „Aufpassermoleküle“ beschützen und lenken die Aminosäureketten bei ihrer Faltung zu dreidimensionalen Gebilden. Dennoch läuft ein Drittel der Faltungen

schief; die Missbildungen müssen umgehend zerstört werden, da sie sonst schnell die Zellfunktionen beeinträchtigen würden.

Unter normalen Umständen werden falsch gefaltete Proteine durch das Transportmoleküle Ubiquitin markiert und zu einem speziellen Proteasom eskortiert, wo es wieder in einzelne Aminosäuren zerlegt und recycelt wird. Doch je älter Zellen werden, desto weniger Energie können sie für diesen Mechanismus bereitstellen. Missgestaltete Proteine verdichten sich zu sogenannten Protofibrillen, welche als Ursache für Alzheimer und andere Alterskrankheiten gelten.¹⁰

Die Simulation dieses dreidimensionalen Getümmels atomarer Interaktionen wird uns helfen zu verstehen, wie die DNS Leben und Krankheit steuert. Wir können dann ebenfalls den Einfluss von Wirkstoffen auf biologische Prozesse simulieren und die Entwicklung zielgerichteter Medikamente mit minimalen Nebenwirkungen beschleunigen.

Die anhand der DNS produzierten Moleküle bestimmen alle Funktionen der Zelle beziehungsweise des ganzen Organismus. Der menschliche Körper produziert beispielsweise in jeder Sekunde fünfhundert Billionen Hämoglobinmoleküle, welche Sauerstoff aus der Lunge in den ganzen Körper transportieren. Allein für die Hämoglobinproduktion führen Ribosomen $1,5 \times 10^{19}$ (fünfzehn Milliarden Milliarden) „Leseoperationen“ pro Minute durch.

In mancherlei Hinsicht ist der biochemische Mechanismus des Lebens komplex und verzwickelt. Auf eine andere Weise ist er jedoch bemerkenswert simpel. Auf nur vier Basenpaaren beruht der Grundbauplan der Menschheit – und des gesamten Lebens auf der Erde. Ribosomen erzeugen Peptidketten, indem sie jedes Basentripel in eine von zwanzig Aminosäuren übersetzen. Die Aminosäuren für sich genommen sind auch recht einfach aufgebaut: Sie bestehen aus einem Kohlenstoff, dessen vier Valenzelektronen mit einer Aminogruppe ($-\text{NH}_2$), einer Carboxylgruppe ($-\text{COOH}$) und einer je nach Aminosäure unterschiedlichen organischen Gruppe verbunden sind. Alanin hat beispielsweise eine organische Gruppe mit nur vier Atomen (CH_3 -) und somit insgesamt dreizehn Atome. Arginin ist eine der komplexeren

Aminosäuren und hat eine organische Gruppe von gerade mal siebzehn Atomen, besteht also insgesamt aus sechsundzwanzig Atomen. Diese einfachen Molekülfragmente sind die Grundbausteine des Lebens.

Die Peptidkette schließlich steuert alles andere: die Struktur von Knochenzellen, die Kontraktion und Koordination von Muskelzellen, die komplexen biochemischen Interaktionen in der Blutlaufbahn – und natürlich die Struktur und Funktion des Gehirns.¹¹

Designer-Baby-Boomer

Das heutige medizinische Wissen reicht aus, Alter und Krankheit soweit aufzuhalten, dass meine Generation (die „Baby-Boomer“) gesund bleiben kann, bis die biotechnische Revolution ihre volle Blüte erreicht, welche wiederum einen Übergang zur nanotechnischen Revolution bilden wird (siehe „Zusätzliche Informationen und Kontakt“ auf [Seite 507](#)). Diese drei Brücken zu einer drastisch verlängerten Lebensspanne habe ich zusammen mit Terry Grossman, einem führenden Experten auf diesem Gebiet, in *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever* ausführlich erörtert.¹² Darin schrieb ich: „Manche meiner Zeitgenossen akzeptieren das Altern als Teil des Kreislaufs des Lebens – ich sehe das anders. Es mag ‚natürlich‘ sein, doch ich finde nichts Positives daran, meine geistigen Fähigkeiten, die Schärfe meiner Sinne, meine physische Geschmeidigkeit, mein sexuelles Verlangen und andere menschliche Fähigkeiten einzubüßen. Ich sehe Krankheit und Tod als Ärgernis, als Probleme, die es zu lösen gilt.“

Die erste Brücke besteht darin, alles derzeit in unserer Macht stehende zu tun, um den Alterungsprozess zu verlangsamen und Krankheiten wie Krebs, Typ-2-Diabetes und Herzinfarkt entgegenzuwirken. Wir sind praktisch in der Lage, unsere Biochemie zu reprogrammieren; unser heutiges Wissen reicht, wenn wir es aggressiv einsetzen, aus, um in der Mehrheit der Fälle die Erbanlagen zu überwinden. „Größtenteils Veranlagung“ – das stimmt nur, wenn man passiv bleibt, was Alter und Krankheit betrifft.

Ich spreche aus eigener Erfahrung. Vor über zwanzig Jahren stellte man bei mir Typ-2-Diabetes fest. Die konventionelle Behandlung

verschlimmerte meinen Zustand, darum entschloss ich mich die Krankheit auf meine eigene Weise – aus der Sicht eines Erfinders – anzugehen. Ich ackerte die Fachliteratur durch und entwickelte mein eigenes Programm, das erfolgreich meine Krankheit heilte. 1993 schrieb ich ein Buch (*The 10% Solution for a Healthy Life*) über meine Erfahrungen; bis heute bin ich frei von jeglichen Diabetes-Symptomen.¹³

Als ich zweiundzwanzig war, starb mein Vater an einer Herzerkrankung, und ich habe seine Anfälligkeit für die Krankheit geerbt. Vor zwanzig Jahren hatte ich – trotz Befolgung der öffentlichen Richtlinien der American Heart Association – einen Cholesterinwert von über 200 (unter 180 sollten es sein), HDL (das „gute Cholesterin“) unter 30 (es sollten über 50 sein) und mein Homocysteinwert (ein Maß für die sogenannte Methylierung) lag bei ungesunden 11 (es sollten unter 7,5 sein). Dank eines zusammen mit Grossman entwickelten Gesundheitsplans ist mein Cholesterinspiegel nunmehr bei 130, mein HDL bei 55 und mein Homocystein bei 6,2. Mein CRP-Wert (C-reaktives Protein; ein Entzündungsindikator) liegt bei sehr gesunden 0,01 und all meine anderen Parameter (für Herzkrankheiten, Diabetes und andere Erkrankungen) haben optimale Werte.¹⁴

Mit vierzig hatte ich ein biologisches Alter von achtunddreißig. Nun bin ich sechsfünfzig, doch eine ausgiebige Untersuchung (unter anderem von Wahrnehmung, Lungenkapazität, Reaktionszeiten und Gedächtnis) in Grossmans Langlebigkeitsklinik ergaben ein biologisches Alter von vierzig.¹⁵ Es gibt kein einheitliches Bemessungsverfahren für das biologische Alter, doch meine Testergebnisse entsprechen dem Bevölkerungsdurchschnitt für diese Altersgruppe. Demzufolge bin ich also in den letzten sechzehn Jahren kaum älter geworden, was sich auch in zahlreichen Bluttests und in meinem eigenen Empfinden widerspiegelt.

Dies ist kein Zufall: ich habe alles daran gesetzt, meine Biochemie zu reprogrammieren. Ich schlucke jeden Tag 250 Tabletten und erhalte jede Woche ein halbes Dutzend intravenöse Behandlungen (größtenteils direkt injizierte Nahrungsergänzungsmittel, die so den Verdauungstrakt umgehen). Dadurch habe ich einen völlig veränderten Stoffwechsel.¹⁶ Techniker, der ich bin, messe ich den Spiegel von Dutzenden Nährstoffen (wie Vitaminen,

Mineralien und Fetten), Hormonen und Stoffwechselprodukten in meinem Blut und anderen Körperproben (wie Haaren und Speichel). Im Großen und Ganzen sind meine Werte, wie sie sein sollen, doch ich nehme kontinuierliche Feineinstellungen meines Programms vor, auf Grundlage von Grossmans und meinen Forschungen.¹⁷ Mein Programm mag extrem erscheinen, aber es funktioniert und ist – nach meinem derzeitigen Wissensstand – optimal. Grossman und ich haben jede der siebenhundert Behandlungen, denen ich mich unterziehe, eingehend erforscht. Von unbewiesenen oder riskanten Ideen (zum Beispiel Wachstumshormonen) lasse ich die Finger.

Die Umkehrung und Überwindung von gefährlichen Krankheiten gleicht einem Krieg. Wie in jedem Krieg gilt es auch in diesem, alle Intelligenz und das gesamte verfügbare Waffenarsenal zu mobilisieren, und dem Feind alles entgegenzusetzen, was man hat. Die Hauptgefahren – wie Herzkrankheit, Krebs, Diabetes, Schlaganfall und Alterung – bekämpfen wir an mehreren Fronten zugleich. Unsere Strategie gegen Herzkrankheiten besteht beispielsweise in einer Kombination aus zehn verschiedenen Präventionstherapien, die jeweils bei anderen Risikofaktoren ansetzen.

Mit mehrgleisigen Strategien gegen alle Alterungs- und Krankheitsprozesse können selbst Baby-Boomer wie ich bei guter Gesundheit durchhalten, bis die zweite Brücke erreicht ist: der Höhepunkt der biotechnischen Revolution, welche bereits begonnen hat und im zweiten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts ihren Höhepunkt haben wird.

Mit der Biotechnik können wir unsere Gene dann wirklich verändern. Neben das Designer-Baby wird der Designer-Baby-Boomer treten. Durch Biotechnik können wir zudem unser Körpergewebe und unsere Organe „jünger machen“ – durch Umwandlung von Hautzellen in frische Körperzellen jeglicher Sorte. Schon heute werden gezielt Wirkstoffe gegen Arteriosklerose (die Ursache von Herzerkrankungen), Tumorbildung und für Krankheit und Alterung verantwortliche Stoffwechselprozesse entwickelt.

Können wir wirklich ewig leben? Ein energischer Vertreter der Umkehrung von Alterungsprozessen und Umgestaltung biologischer

Informationsprozesse ist Aubrey de Grey (Fachgebiet Genetik der Cambridge University). De Grey zieht die Parallele zur Instandhaltung eines Hauses: Wie lange ein Haus hält, hängt ganz offensichtlich davon ab, wie gut wir uns darum kümmern. Übt man sich in Nichtstun, so wird das Dach auf kurz oder lang undicht, Wasser dringt ein und das Haus verfällt. Pfllegt man jedoch die Struktur, repariert die Schäden, beugt Gefahren vor, renoviert und ersetzt hin und wieder Teile und greift dabei auf die neueste Technik zurück, so lässt sich die Lebensdauer des Hauses auf unbegrenzte Zeit verlängern.

Dasselbe gilt für Körper und Gehirne. Der Unterschied ist: während wir Prinzipien der Wartung eines Hauses genau kennen, haben wir noch nicht alle biologischen Prinzipien des Lebens verstanden. Doch durch die schnell fortschreitende Ergründung biochemischer Prozesse und biologischer Abläufe werden wir dieses Wissen bald erlangen. Wir beginnen Alterung nicht als einheitlichen, unausweichlichen Vorgang, sondern als eine Gruppe miteinander verknüpfter Prozesse zu verstehen, die wir mithilfe von Biotechnik vollständig aufhalten können.

De Greys erklärtes Ziel ist „künstliche Langlebigkeit“, also zu verhindern, dass Körper und Hirn mit zunehmendem Alter gebrechlich und krankheitsanfällig werden.¹⁸ Er erklärt: „Alle wichtigen Techniken für die Entwicklung *künstlicher Langlebigkeit* sind bereits in unserem Besitz – sie müssen nur noch zusammengebracht werden.“¹⁹ De Grey rechnet innerhalb von zehn Jahren mit „stabil verjüngten Mäusen“, sprich Mäusen, die funktional jünger sind als vor der Behandlung und dementsprechend länger leben. Dadurch wird sich, so de Grey, die öffentliche Wahrnehmung drastisch verändern. Die Demonstration, dass wir den Alterungsprozess eines Tieres umkehren können, dessen Erbmateriel zu 99 Prozent mit dem unseren übereinstimmt, würde die Unausweichlichkeit von Alter und Tod infrage stellen. Nach den ersten Erfolgen bei Tieren wird man in einem großen Wettrennen alles daran setzen, diese Ergebnisse auf den Menschen zu übertragen, was etwa fünf bis zehn Jahre dauern sollte.

Das breite Feld der Biotechnik wird vorangetrieben durch ein immer schnelleres Reverse Engineering biologischer Informationsprozesse und ein wachsendes Arsenal von Werkzeugen, um diese zu modifizieren.

Beispielsweise bestand die Entwicklung medizinischer Wirkstoffe früher beispielsweise in der Suche nach Substanzen mit irgendeinem vorteilhaften Effekt ohne allzu große Nebenwirkungen – ähnlich wie man in der Steinzeit Werkzeuge „entwickelte“, indem man nach Steinen oder anderen Gegenständen mit nützlichen Eigenschaften suchte. Heute dagegen erforschen wir die genauen biochemischen Prozesse, die Krankheiten und Alterung verursachen, und entwickeln Wirkstoffe, die präzise umrissene Aufgaben auf molekularer Ebene erfüllen – die Einsatzmöglichkeiten sind zahllos.

Man kann auch direkt am Rückgrat biologischer Informationsprozesse, dem Genom, ansetzen. Die moderne Gentechnik steht kurz davor, die Genexpression direkt steuern zu können. Genexpression ist der Prozess, in dem bestimmte Zellkomponenten (RNS und Ribosome) Proteine nach genetischen Bauplänen erzeugen. Jede menschliche Zelle enthält eine Kopie der kompletten Gensequenz für den ganzen Körper, doch in der einzelnen Zelle wird stets nur ein Teil der Gene exprimiert, wodurch die spezifischen Charakteristiken der jeweiligen Zellart, etwa Haut- oder Muskelzellen, entstehen.²⁰ Therapeutische Einflussnahme auf die Genexpression kann im Zellplasma erfolgen, was deutlich einfacher ist als ein direkter Eingriff in den Zellkern.

Die Genexpression wird durch Polypeptide (kleine Proteine mit bis zu einhundert Aminosäuren) und kurze RNS-Fragmente gesteuert. Derzeit werden die genauen Mechanismen erforscht und Therapien entwickelt, die darauf setzen, die Expression krankheitsfördernder Gene zu unterbinden oder Gene mit wünschenswerten Effekten zu aktivieren.²¹

RNSi (RNS-Interferenz). Die sogenannte RNS-Interferenz ist ein machtvolles Instrument um gezielt Gene zu deaktivieren. Dabei werden bestimmte mRNS-Sequenzen blockiert, sodass sie keine Proteine erzeugen können. Da neben vielen anderen Krankheiten auch Krebs und virale Erkrankungen von der Genexpression Gebrauch machen, könnte RNS-Interferenz von großem medizinischem Nutzen sein. Wissenschaftler können kurze, doppelstrangige RNS-Fragmente erzeugen, die auf Teile der transkribierten RNS passen, sich mit dieser paaren und dadurch die

Synthese des Zielproteins verhindern – das betroffene Gen wird dadurch praktisch deaktiviert. Bei vielen Erbkrankheiten ist nur eine der Kopien des fraglichen Gens schadhaft. Da wir über zwei Kopien von jedem Gen verfügen, kann die verbleibende, gesunde Kopie die Produktion des benötigten Proteins übernehmen. Sind beide Genkopien defekt, so können beide durch RNSi deaktiviert werden – in diesem Fall muss jedoch das gesunde Gen künstlich eingefügt werden.²²

Stammzelltherapie. Ein anderer Angriffspunkt ist das Nachzüchten von Zellen, Geweben und ganzen Organen und die Installation derselben im Körper, ganz ohne chirurgische Eingriffe. Durch „therapeutisches Klonen“ werden wir Gewebe und Organe aus körpereigenen, künstlich verjüngten Zellen züchten können. Wir werden zum Beispiel in der Lage sein, neue Herzzellen aus Hautzellen zu erzeugen und über den Blutkreislauf in den Körper einzuschleusen. Mit der Zeit ersetzen die neuen Zellen dann existierende Herzzellen, mit dem Ergebnis eines aus eigener DNS erzeugten, „jungen“ Herzens. Weiter unten beschreibe ich diesen Ansatz genauer.

Genchips. Unser wachsendes Wissen über Genexpression ermöglicht nicht nur neue Therapien. Seit den 1990ern benutzen Forscher Microarrays – Chips, nicht größer als ein Centstück –, um das Expressionsmuster tausender Gene simultan zu ermitteln und zu vergleichen.²³ Die Anwendungsmöglichkeiten dieser Technik sind vielfältig und die technischen Hürden sind deutlich geschrumpft, weshalb die Ergebnisse von „Genuntersuchungen im Hausgebrauch“ mittlerweile riesige Datenbanken füllen.²⁴

Einige Einsatzmöglichkeiten von Genexpressionsanalyse:

- *Wirkstoffanalyse und -entdeckung.* Microarrays können „nicht nur die Aktivität einer Verbindung bestätigen“, sondern „zwischen verschiedenen Verbindungen unterscheiden, die auf verschiedenen Stufen desselben Stoffwechselvorgangs wirken“.²⁵
- *Krebsklassifizierung.* Eine Studie in *Science* zeigte, dass sich bestimmte Formen von Leukämie „allein durch

Genexpressionsanalyse“ klassifizieren lassen. Die Autoren führen auch einen Fall an, indem eine Fehldiagnose anhand von Expressionsprofilen korrigiert werden konnte.²⁶

- *Identifizierung von an Prozessen wie Alterung und Tumorbildung beteiligten Genen, Zellen und Prozessen.* Beispielsweise zeigte eine Studie einen Zusammenhang zwischen Expressionsprofilen von Genen, die am programmierten Zelltod beteiligt sind, und akuter myeloischer Leukämie. Daraus ergeben sich potenziell neue Ansatzpunkte für Therapien.²⁷
- *Feststellung der Effektivität neuer Therapien.* Eine in *Bone* veröffentlichte Studie untersuchte den Effekt von synthetischen Wachstumshormonen auf die Expression von insulinähnlichen Wachstumsfaktoren („insulinlike growth factors“, IGFs) und Markern des Knochenstoffwechsels.²⁸
- *Schneller Test der Verträglichkeit von Lebensmittelzusätzen, Kosmetik und Industrieprodukten ohne Tierversuche.* Solche Tests können beispielsweise zeigen, inwiefern Gene durch die jeweilige Substanz deaktiviert oder verstärkt werden.²⁹

Somatische Gentherapie (Gentherapie in nichtreproduktiven Zellen).

Der heilige Gral der Biotechnik. Gentherapie bedeutet direkte Veränderung von Genen im Zellkern durch „Infektion“ mit neuer DNS, wodurch praktisch neue Gene erzeugt werden.³⁰ Die Manipulation menschlichen Erbmateri als wird zumeist mit genveränderten neuen Generationen, sogenannten Designer-Babys, assoziiert. Doch das wahre Potenzial von Gentherapie liegt in der genetischen Veränderung von ausgewachsenen Menschen.³¹ Auch bei Erwachsenen können krankheitsfördernde Gene blockiert oder neue Gene, die den Alterungsprozess verlangsamen oder umkehren, eingefügt werden.

In den 1970ern und 1980ern begonnene Studien an Tieren brachten transgene Schafe, Hühner, Kaninchen und Igel hervor. Die ersten Versuche mit Gentherapie bei Menschen wurden 1990 unternommen. Die Herausforderung besteht darin, therapeutische DNS so in den Zielzellen zu installieren, dass sie im richtigen Umfang und zum richtigen Zeitpunkt exprimiert wird.

Häufig werden Viren als Transportmedium für Gene herangezogen: Viren sind seit Langem in der Lage, genetisches Material in menschliche Zellen einzuschleusen – wodurch es in manchen Fällen zu Erkrankungen kommt. Forscher können jedoch einfach das zu übertragende Erbmateriale eines Virus mit therapeutischer DNS vertauschen. Dies ist ein relativ einfaches Verfahren, leider sind die Gene häufig zu groß, um in bestimmte Zellarten (wie Gehirnzellen) einzudringen. Zudem können Viren nur eine DNS-Sequenz beschränkter Länge übertragen und lösen unter Umständen eine Immunantwort aus. Außerdem ist weitgehend unkontrollierbar, wo genau in die DNS der Zelle die Gene eingefügt werden.³²

Physikalische Injektion (Mikroinjektion) von DNS in Zellen ist machbar, aber viel zu teuer – doch andere Übertragungsmittel sind in Aussicht. Liposome – kugelförmige Anordnungen von Fettmolekülen mit hydrophilem Kern – können als „molekulares Trojanisches Pferd“ dienen, um Gene in Gehirnzellen zu schmuggeln und Erkrankungen wie Parkinson und Epilepsie zu bekämpfen.³³ Eine Reihe von Molekülen (unter anderem Proteine, RNS und DNS) kann auch mithilfe von Elektroschocks in Zellen geschleust werden.³⁴ Zusätzlich kann DNS zu extrem kleinen „Nanobällen“ verdichtet werden, um die Effektivität der Gentherapie zu vergrößern.³⁵

Die größte Schwierigkeit ist die korrekte Platzierung der neuen Gene im DNS-Strang der Zelle und die Regulation der Expression. Eine Möglichkeit besteht darin, ein zusätzliches „Reportergen“ mit anzuhängen, das Signale erzeugt, durch welche die Position und Aktivität der transponierten Gene von außen erkennbar wird.³⁶

Trotz der hohen Hürden nimmt Gentherapie für Menschen allmählich Gestalt an. Ein Forscherteam um Andrew H. Baker (Glasgow University) benutzte Adenoviren, um bestimmte Organe und sogar spezifische Bereiche in den Organen gezielt zu „infizieren“. Ihnen gelang beispielsweise eine gezielte Gentherapie von Endothelzellen, welche die Blutgefäße auskleiden. Auch das von Craig Venter (einem der Protagonisten bei der Sequenzierung des menschlichen Genoms) gegründete Unternehmen Celera Genomics forscht auf diesem Gebiet. Celera Genomics ist es gelungen, künstliche Viren aus genetischen Informationen zu erzeugen; das Unternehmen plant, solche Viren für Gentherapie einzusetzen.³⁷

United Therapeutics, ein Unternehmen, an dessen Leitung ich beteiligt bin, hat begonnen, in klinischen Studien erste Transplantationen von autologen (aus Eigenblut gewonnenen) Stammzellen bei Menschen vorzunehmen. Dabei werden die Zellen mit DNS versehen, die das Wachstum neuer Lungengefäße fördert, und wieder ins Blut des Patienten gespritzt. Wenn diese Zellen Kapillaren um Lungenbläschen erreichen, beginnen sie, Wachstumsfaktoren für neue Blutgefäße zu exprimieren. Bei Tieren heilte dieses Verfahren erfolgreich pulmonale Hypertonie, eine schwere und bisher unheilbare Krankheit. Infolge der überzeugenden Ergebnisse in den Tierversuchen gab die kanadische Regierung grünes Licht für klinische Studien ab 2005.

Degeneration rückgängig machen

Über 90 Prozent der Todesfälle in unserer Gesellschaft gehen auf das Konto von degenerativen (immer weiter fortschreitende) Krankheiten: Herzerkrankungen, Schlaganfälle, Krebs, Typ-2-Diabetes und Nierenleiden. Unser Verständnis der Grundlagen von degenerativen Krankheiten und Alterung wächst täglich, und mittlerweile haben sich Strategien herauskristallisiert, mit denen diese Prozesse gestoppt und sogar rückgängig gemacht werden können. In *Fantastic Voyage* beschreiben Grossman und ich ein breites Spektrum an derzeit im Test befindlichen Therapien, welche an entscheidenden biochemischen Schritten pathologischer Prozesse ansetzen und bereits signifikante Erfolge verzeichnen können.

Herzkrankheiten bekämpfen. Eines von vielen Beispielen sind die Versuche mit rekombinantem ApoA-1 Milano (AA1M), einer synthetischen Form von HDL-Cholesterin. In Tierversuchen bewirkte AA1M einen schnellen und drastischen Rückgang von arteriosklerotischen Ablagerungen.³⁸ In Phase 1 einer FDA-Studie mit siebenundvierzig Testpersonen bewirkte die intravenöse Verabreichung von AA1M nach nur fünf Wochen einen merklichen Rückgang (durchschnittlich 4,2 Prozent) der Ablagerungen – das ist Rekord bei der medikamentösen Behandlung von Arteriosklerose.³⁹

Das von Pfizer entwickelte Torcetrapib, ein anderes interessantes, nun in Testphase 3 befindliches Medikament, erhöht den HDL-Spiegel, indem es ein Enzym blockiert, das normalerweise HDL abbaut.⁴⁰ Pfizer investierte die Rekordsumme von einer Milliarde Dollar in die Erprobung dieses Wirkstoffs, und plant, ihn mit ihrem viel verkauften (cholesterinsenkenden) Medikament Lipitor zu kombinieren.

Krebs überwinden. Diverse Strategien zur Krebsbekämpfung werden derzeit intensiv erforscht. Besonders vielversprechend erscheinen Impfstoffe, die das Immunsystem anregen, Krebszellen anzugreifen. Sie sind sowohl prophylaktisch als auch zur akuten Behandlung einsetzbar, oder um nach anderen Behandlungen verbliebene Krebszellen zu eliminieren.⁴¹

Die ersten Versuche, die Immunantwort eines Patienten gezielt auszulösen, wurden vor über hundert Jahren unternommen – mit mäßigem Erfolg.⁴² Die heutigen Bemühungen konzentrieren sich auf die Anregung dendritischer Zellen, die Wachpatrouillen des Immunsystems. Dendritische Zellen durchstreifen den Körper, sammeln fremdartige Peptide und Zellfragmente, und transportieren diese zu den Lymphknoten, welche eine Armee von T-Zellen produzieren, um die markierten Partikel zu eliminieren.

Manche Forscher versuchen die Gene von Krebszellen so zu verändern, dass sie T-Zellen anlocken, in der Hoffnung, dass die T-Zellen dadurch lernen, selbstständig andere Krebszellen zu erkennen.⁴³ Andere experimentieren mit Impfungen, welche die dendritischen Zellen mit typischen Antigenen (Oberflächenproteinen) von Krebszellen konfrontieren. Eine Gruppe setzte Elektroschocks ein, um Tumore und Immunzellen zu vermischen und dadurch eine „individualisierte Impfung“ herzustellen.⁴⁴ Ein Problem bei der Entwicklung effektiver Impfstoffe ist, dass noch zu wenige Krebsantigene bekannt sind.⁴⁵

Eine andere Strategie gegen Krebs besteht darin, durch Medikamente die Angiogenese zu hemmen. Unter Angiogenese versteht man das Wachstum neuer Blutgefäße – ein Prozess, ohne den Krebstumore keine nennenswerte Größe erreichen können. Das Interesse an Angiogenese ist 1997 schlagartig

gestiegen; damals berichteten Ärzte des Dana Farber Cancer Center in Boston von Fällen vollständiger Tumorrückbildung nach mehrmaliger Behandlung mit Endostatin, einem Angiogenesehemmer.⁴⁶ Mittlerweile befinden sich mehrere entsprechende Medikamente in der Testphase, beispielsweise Avastin und Atrasentan.⁴⁷

Sowohl für Krebs als auch für Alterung spielen sogenannte Telomere eine wichtige Rolle: repetitive DNS-Sequenzen an den Enden der Chromosomen. Bei jeder Zellteilung werden die Telomere um ein Stück verkürzt; sind die Telomere vollständig abgebaut, so ist die Zelle nicht länger teilungsfähig und stirbt. Würde man diesen Prozess umkehren, so könnten die Zellen prinzipiell ewig leben. Dies ließe sich mithilfe eines einzigen Enzyms (Telomerase) erreichen.⁴⁸

Die Schwierigkeit besteht darin, dabei keinen künstlichen Krebs zu erzeugen. Tatsächlich verfügen Krebszellen über ein Gen für ebendieses Enzym, was sie quasi unsterblich macht. Eine mögliche Maßnahme gegen Krebs ist darum das Unterbinden der Telomeraseproduktion. Dies mag im Widerspruch zu der Idee stehen, Telomere zu verlängern, um der Zellalterung entgegenzuwirken, doch eine gezielte Telomeraseblockierung in Krebszellen muss nicht unbedingt mit einer allgemeinen Telomererweiterungstherapie kollidieren. Um Komplikationen zu vermeiden, könnte es jedoch ratsam sein, solche Theapien für die Dauer der Krebsbehandlung auszusetzen.

Das Ende des Alterns

Es erscheint einleuchtend, dass es in der frühen Evolution unserer Spezies (und ihrer Vorgänger) nicht hilfreich, sondern eher hinderlich gewesen wäre, wenn Individuen deutlich länger gelebt hätten, als notwendig, um ihre Nachkommen großzuziehen. Mittlerweile mehren sich jedoch Indizien für die sogenannte Großmutter-Hypothese, welche das Gegenteil besagt. Rachel Caspari (University of Michigan) und San-Hee Lee (University of California in Riverside) fanden Hinweise dafür, dass der Anteil an Menschen, die Großeltern werden – in primitiven Zivilisationen musste man dafür nicht älter als dreißig werden – über die letzten zwei Millionen

Jahre kontinuierlich angestiegen ist, mit einer Verfünffachung im Paläolithikum (vor etwa dreißigtausend Jahren). Dieses Ergebnis dient oft als Argument dafür, dass Großeltern eine nützliche Funktion in menschlichen Gesellschaften erfüllen, indem sie die Großfamilie unterstützen und ihr gesammeltes Wissen weitergeben. Das mag soweit eine sinnvolle Interpretation der Daten sein, doch die Steigerung der Lebenserwartung ist eine Entwicklung, die bis zum heutigen Tag anhält. Für die in der Großmutter-Hypothese angeführten evolutionären Vorteile würde eine geringe Zahl „langlebiger“ Menschen ausreichen. Daher bleibt Raum für die zusätzliche Hypothese, dass Gene, die die Lebenserwartung deutlich erhöhen, evolutionär begünstigt wurden.

Alterung ist kein einheitlicher Prozess, sondern beinhaltet eine Vielzahl von Veränderungen. De Grey beschreibt sieben Hauptfaktoren der Vergreisung und benennt Strategien, um jeden einzelnen davon zu eliminieren.

DNS-Mutationen.⁴⁹ In der Regel führen Mutationen im Zellkern zu einer defekten Zelle, die schnell ausscheidet oder einfach nicht optimal arbeitet. Problematisch sind Mutationen, welche die ordnungsgemäße Reproduktion der Zelle stören und Krebs verursachen. Falls es uns also gelingt, mithilfe der oben beschriebenen Strategien Krebs zu heilen, so sollten DNS-Mutationen keine Gefahr mehr darstellen. De Grey schlägt eine prophylaktische Gentherapie vor, die aus all unseren Zellen diejenigen Gene entfernt, die von Krebszellen aktiviert werden, damit sich deren Telomere bei der Zellteilung nicht mehr verkürzen. Dadurch würde jegliches Tumorstadium im Keim verhindert. Methoden zur Löschung und Deaktivierung von Genen sind bereits verfügbar und werden immer besser.

Toxische Zellen. Gelegentlich erreichen Zellen einen Zustand, in dem sie zwar keinen Krebs verursachen, aber dennoch am besten aus dem Körper entfernt würden. Beispielsweise wenn sie zu alt werden, oder zu viele Fettzellen vorhanden sind. In diesem Fall ist es einfacher, diese Zellen abzutöten, als zu versuchen, sie wieder in einen gesunden Zustand zu

überführen. Die Forschung entwickelt Methoden, um gezielt den „programmierten Zelltod“ auszulösen, beziehungsweise um Zellen zu markieren, damit sie vom Immunsystem zerstört werden.

Mutationen in Mitochondrien. Auch in den dreizehn Genen der Mitochondrien, den eigenständigen Energielieferanten unserer Zellen, können sich Mutationen anhäufen.⁵⁰ Die mitochondrialen Gene sind kritisch für ein effizientes Funktionieren der Zelle und unterliegen einer höheren Mutationsrate als das Erbgut im Zellkern. Wenn somatische Gentherapie ausgereift ist, können wir Sicherheitskopien dieser wichtigen Gene im Zellkern anlegen. Jede Zelle verfügt über Mechanismen, um im Zellkern kodierte Proteine in die Mitochondrien zu transportieren, daher besteht keine Notwendigkeit, Proteine direkt in den Mitochondrien zu produzieren – auch im Normfall stammt die Mehrzahl der in Mitochondrien wirkenden Proteine aus dem Zellkern. In Zellkulturen ist Wissenschaftlern die Übertragung von Genen aus Mitochondrien in den Zellkern bereits gelungen.

Intrazelluläre Aggregationen. Sowohl innerhalb als auch außerhalb der Körperzellen entstehen Giftstoffe. De Grey schlägt somatische Gentherapien vor, die neue Gene einführen, welche abbauen, was er als „intrazelluläre Aggregationen“ bezeichnet: Ablagerungen von Giftstoffen innerhalb der Zellen. Es gibt Proteine, die praktisch jede Art von Schadstoff vernichten können, mithilfe von Bakterien, die gefährliche Substanzen – von Dioxin bis TNT – verdauen und abbauen.

Zur Bekämpfung von Giftstoffen außerhalb von Zellen, einschließlich deformierter Proteine und Amyloidablagerungen (siehe Alzheimer und andere degenerative Krankheiten), werden Impfstoffe entwickelt, welche die molekularen Bestandteile dieser Substanzen angreifen.⁵¹ Dies kann zwar dazu führen, dass die Schadstoffe von Immunzellen aufgenommen werden, doch mithilfe der oben beschriebenen Gentherapie können sie dort abgebaut werden.

Extrazelluläre Aggregationen. AGEs („advanced glycation endproducts“) entstehen durch unvorteilhafte Querverknüpfungen von nützvollen

Molekülen bei Zuckerüberschuss. Jene Querverbindungen beeinträchtigen die Funktion dieser Moleküle und tragen entscheidend zum Alterungsprozess bei. Der experimentelle Wirkstoff ALT-711 (Phenacyldimethylthiazoliumchlorid)* kann die Verbindungen lösen, ohne das ursprüngliche Gewebe zu beschädigen.⁵² Es wurden weitere Moleküle mit dieser Eigenschaft gefunden.

Zellverlust und Atrophie. Unser Körper kann verbrauchte Zellen ersetzen, doch in bestimmten Organen ist diese Fähigkeit eingeschränkt. Wenn wir älter werden, kann das Herz seine Zellen beispielsweise nicht mehr schnell genug erneuern, was es durch Vergrößerung der bestehenden Zellen und Verfaserung kompensiert. Darum wird das Herz mit der Zeit spröde und schwach. Dem kann das oben beschriebene therapeutische Klonen abhelfen.

In Tierversuchen schlagen wir uns bereits wacker im Kampf gegen all diese Symptome des Alterns – die Humanmedizin wird bald folgen. Ergebnisse des Humangenomprojekts deuten darauf hin, dass nicht mehr als ein paar Hundert Gene an Alterungsprozessen beteiligt sind. Die Manipulation dieser Gene erzielte in Tierversuchen eine drastische Verlängerung der Lebensdauer. Bei *C. elegans* (einer Fadenwurmart) führte eine Anpassung von Genen, die den Insulin- und Geschlechtshormonspiegel steuern, zu einer Versechsfachung der Lebensdauer – was bei einem Menschen einer Lebenserwartung von fünfhundert Jahren entspricht.⁵³

In einem möglichen Szenario der zukünftigen Bio- und Nanotechnik werden biologische Zellen zu Computern. Diese „Zellen mit erweiterter Intelligenz“ können Krebszellen und Krankheitserreger erkennen und zerstören und sogar Körperteile nachwachsen lassen. Der Biochemiker Ron Weiss (Princeton) stattete Zellen mit einer Reihe grundlegender logischer Operationen aus.⁵⁴ Timothy Gardner (Boston University) hat zelluläre Logikschaltungen entwickelt – ein weiterer Schritt in Richtung intelligenter Zellen.⁵⁵ Forscher des MIT Media Lab haben Wege gefunden, um drahtlos Nachrichten und Befehle an die Computer in modifizierten Zellen zu übermitteln.⁵⁶ Weiss erklärt: „Sobald man Zellen programmieren kann, ist

man nicht auf das beschränkt, was Zellen ohnehin schon können. Man kann sie programmieren, völlig neue Dinge zu tun.“

Der uninteressanteste Aspekt der Klontechnik: das Klonen von Menschen

Eines der mächtigsten Werkzeuge, die wir in der Natur vorfinden, ist der biologische Reproduktionsmechanismus. Die Klontechnik macht sich diesen Mechanismus zunutze. Klonen wird in der Zukunft von großer Bedeutung sein, allerdings nicht das Klonen ganzer Menschen, sondern „therapeutisches Klonen“ zur Lebensverlängerung: die Erzeugung von Gewebe aus „jungen“ Zellen, mit erweiterten Telomeren und korrigierter DNS, um defektes Gewebe und Organe zu ersetzen – ganz ohne chirurgische Eingriffe.

Das Klonen kompletter Menschen wird derzeit weitgehend als unethisch angesehen. Ich teile diese Meinung – allerdings nicht aus Bedenken gegen Manipulation der menschlichen Natur, sondern weil die Technik schlichtweg noch zu unzuverlässig ist. Die derzeitige Vorgehensweise, bei der ein fremder Zellkern mithilfe eines elektrischen Funkens in die Eizelle verbracht wird, erzeugt zu viele Genfehler.⁵⁷ Darum überleben die auf diese Weise erzeugten Föten zumeist nicht, und wenn sie durchkommen, leiden sie an genetischen Defekten. Dolly das Schaf war zum Beispiel übergewichtig; fast alle anderen bislang geklonten Tiere hatten ebenfalls unvorhergesehene Gesundheitsprobleme.⁵⁸

Es gibt eine Reihe von Ideen für ein perfektes Klonen, etwa für alternative Befruchtungsmethoden, die ohne den zerstörerischen elektrischen Funken auskommen. Doch bis die Technik erwiesenermaßen sicher ist, sollte davon abgesehen werden, ein menschliches Leben mit so großen Gesundheitsrisiken zu erschaffen. Ohne Zweifel werden eines nicht allzu fernen Tages Menschen geklont werden, aus den üblichen Beweggründen, sprich Publicity und dem Wunsch nach Unsterblichkeit. Klonverfahren für höhere Tierarten werden sich leicht auf den Menschen übertragen lassen, und sobald die Technik ausgereift und sicher ist, wird die ethische Barriere nahezu verschwinden.

Klonen an sich ist von großer Bedeutung, das Klonen von Menschen ist jedoch nicht die nennenswerteste Form dieser Technik. Wir wollen zunächst ihre wertvollsten Anwendungen betrachten und später wieder auf die kontroverseste zurückkommen.

Warum ist Klonen so bedeutend? Der naheliegendste Einsatz ist die Verbesserung der Viehzucht durch direkte Erzeugung von Tieren mit den gewünschten genetischen Eigenschaften. So können etwa transgene Tiere erzeugt werden, die pharmazeutische Wirkstoffe hervorbringen – beispielsweise produzieren transgene Ziegen mit ihrer Milch den vielversprechenden Anti-Krebs-Wirkstoff aaATIII.⁵⁹

Erhaltung und Wiederherstellung gefährdeter und ausgestorbener Arten. Eine andere interessante Anwendung ist die Wiederherstellung ausgestorbener Spezies. Durch Einfrieren von Zellen können Pflanzen und Tiere vor der völligen Ausrottung bewahrt werden. 2001 gelang es Forschern, die DNS des seit fünfundsechzig Jahren ausgestorbenen Tasmanischen Tigers zu synthetisieren, in der Hoffnung, diese Tierart wieder zum Leben zu erwecken.⁶⁰ Wenn Spezies schon so lange ausgestorben sind wie beispielsweise die Dinosaurier, sind die Chancen gering, Zellen mit vollständig intakter DNS zu finden, wie es in *Jurassic Park* der Fall war. Es ist jedoch durchaus wahrscheinlich, dass wir auch solche DNS-Sequenzen irgendwann anhand fragmentarischer Funde zusammenflicken können.

Therapeutisches Klonen. Die vielleicht wichtigste Anwendung ist therapeutisches Klonen der eigenen Organe. Gentechniker können die Differenzierung von Zellen der Keimbahn (also Zellen, aus denen gewöhnlich Spermien beziehungsweise Eizellen entstehen würden) so beeinflussen, dass sie sich in die gewünschten Zellarten verwandeln. Dieses Verfahren ist nicht unumstritten, da jedoch die Differenzierung noch vor der Entstehung eines Embryos stattfindet, wird es zumeist als ethisch unbedenklich angesehen.⁶¹

Somatisches Klonen. Diese Spielart des Klonens ist noch aussichtsreicher, da sie die umstrittene Stammzellthematik völlig umgeht. Somatisches Klonen erzeugt neues Gewebe mit der eigenen DNS des Patienten durch Umwandlung beliebiger Zellarten, beispielsweise Haut- zu Herzzellen.⁶² Amerikanischen und norwegischen Wissenschaftlern ist es gelungen, Leberzellen zu Bauchspeicheldrüsenzellen umzuprogrammieren. In einer anderen Versuchsreihe wurden Hautzellen Eigenschaften von Immun- und Nervenzellen verliehen.⁶³

Die Ausgangsfrage lautet: Woher kommen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Körperzellen? Schließlich tragen sie alle die gleiche DNS. Wie zuvor beschrieben, ist die Steuerung durch Transkriptionsfaktoren in Form von RNS-Fragmenten und Peptiden für diese Unterschiede verantwortlich.⁶⁴ Durch Manipulation dieser Moleküle können wir die Genexpression beeinflussen und Zellarten ineinander umwandeln.

Die Realisierung dieser Technik würde nicht nur ethische und politische Kontroversen vermeiden, sondern wäre auch medizinisch gesehen ideal. Um Autoimmunreaktionen zu vermeiden, wäre es nur vorteilhaft, Patienten mit Organewebe – oder komplett neuen Organen – aus eigener DNS zu versorgen, anstatt aus der DNS fremder Keimzellen. Zudem könnte man anstelle kostbarer Stammzellen die im Überfluss vorhanden Hautzellen des Patienten benutzen.

Durch Transdifferenzierung können Organe mit der eigenen genetischen Konfiguration gezüchtet werden. Die Telomere dieser Organe können auf die ursprüngliche Länge erweitert werden, wodurch praktisch ein junges Organ entsteht.⁶⁵ Durch Auswahl von Hautzellen ohne genetische Defekte für den Klonprozess kann die Anhäufung von Mutationen vermieden werden. Ein achtzigjähriger Mann könnte auf diese Weise sein Herz durch das Herz, was er im Alter von fünfundzwanzig hatte, ersetzt bekommen. Die Behandlung von Typ-1-Diabetes erfordert den Einsatz starker Immunsuppressiva, die gefährliche Nebenwirkungen haben können.⁶⁶ Durch somatisches Klonen können die Patienten mit neuen, durch Umwandlung von körpereigenen Hautzellen (Transdifferenzierung) oder Stammzellen gewonnenen Bauchspeicheldrüsenzellen versorgt werden. Der Vorrat an Ersatzzellen mit

körpereigener DNS wäre praktisch unerschöpflich, Immunsuppressiva wären überflüssig. (Um Typ-1-Diabetes vollständig zu heilen müssen wir jedoch die Autoimmunerkrankung beheben, welche dazu führt, dass der Körper seine eigenen Inselzellen zerstört).

Spannend ist vor allem der Aspekt, dass die Verjüngung von Organen und anderem Gewebe keinerlei chirurgische Eingriffe mehr erfordern wird. Die Klonzellen mit korrigierter DNS und erweiterten Telomeren werden sich von selbst in das alte Gewebe integrieren – nach wiederholter Behandlung besteht das Gewebe dann schließlich überwiegend aus jungen Zellen. Die Zellen des Körpers werden ohnehin regelmäßig ersetzt, warum also nicht gleich durch jüngere, verbesserte Zellen? Nichts spricht dagegen, dass wir diesen Prozess auf jedes unserer Organe anwenden und dadurch immer jünger werden können.

Nahrungsmittelknappheit beenden. Klontechnik kann den Hunger auf der Welt beenden: durch geklontes Fleisch und andere Proteinquellen vom Band – ganz *ohne Viehhaltung*. Kosten würden gespart, Pestizide und Hormonbelastungen vermieden, die Umweltbelastung (im Vergleich zu Massentierhaltung) reduziert, der Nährwert verbessert und der Tierquälerei ein Ende gesetzt. Auch hier würden nicht komplette Tiere geklont, sondern nur die gewünschten Teile. Sämtliches Fleisch – Millionen von Tonnen – würde gewissermaßen von einem einzigen Tier stammen.

Dieses Verfahren würde nicht nur den Hunger beseitigen. Die Fleischproduktion würde auf diese Weise dem Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs – der exponentiellen Verbesserung der Preis-Leistung von Informationstechnik – unterworfen und dadurch extrem preisgünstig. Wiewohl Hungersnöte gegenwärtig durch politisches Versagen und Konflikte verschärft werden, könnte geklontes Fleisch die Welternährungssituation völlig umkrempeln.

Viehloses Fleisch würde auch das Leiden der Tiere beenden. Das wirtschaftliche Kalkül der Massentierhaltung legt wenig Wert auf artgerechte Haltung, Tiere sind nicht mehr als die Zahnräder einer Produktionsmaschine. Klonfleisch hingegen wüchse nicht mehr als Teil eines Tieres mit Nervensystem heran, womit die Voraussetzung für

Leidensempfinden – nach mehrheitlicher Auffassung – nicht gegeben wäre. Auch andere Tierprodukte wie Leder und Pelz könnten auf diese Weise erzeugt werden. Zudem würde der massiven Umweltzerstörung durch Viehzucht Einhalt geboten; Risiken durch Prionkrankheiten wie BSE und Creutzfeldt-Jakob würden vermieden.⁶⁷

Ein zweiter Blick aufs Menschenklonen. Das bringt uns wieder zurück zum Anfangsthema. Wie zuvor beschrieben ist meine Einschätzung, dass das Klonen kompletter Menschen weder das von Kritikern prophezeite ethische Dilemma, noch die von Befürwortern gepriesenen Segnungen bringen wird. Was ist schon dabei, einen genetischen Zwilling mit einer oder mehr Generationen Abstand zu haben? Wie viele andere Techniken auch wird das Klonen von Menschen kurze Zeit umstritten, schon bald darauf aber akzeptiert sein. Physisches Klonen ist meilenweit entfernt von einer mentalen Kopie, welche Persönlichkeit, Erinnerungen, Fähigkeiten und Lebensgeschichte eines Menschen auf ein anderes Medium überträgt. Genetisches Klonen wirft keine philosophische Identitätsfrage auf, da geklonte Menschen immer noch verschiedene Personen sind, verschiedener als (ebenfalls genetisch identische) eineiige Zwillinge von heute.

Zwischen der Klontechnik, von Zellen bis hin zu ganzen Organismen, und den anderen Revolutionen in Biologie und Berechnungstechnik werden sich viele Synergieeffekte ergeben. Während wir Genome und Proteome (Gesamtheit der exprimierten Proteine) von Menschen und Tieren erforschen und Methoden entwickeln, um genetische Informationen zu handhaben, bietet die Klontechnik uns die Möglichkeit, unser Wissen in die Praxis umzusetzen und Tiere, Organe und Zellen zu replizieren. Dies wird sich tiefgreifend auf Gesundheit und Wohlergehen von Mensch und Tier auswirken.

NEDD LUDD: *Wenn sich jeder seine Gene aussuchen kann, wird es nur noch rundum „perfekte“ Menschen geben. Dann gibt es keinerlei Vielfalt mehr, und individuelle Höchstleistungen werden bedeutungslos.*

RAY: *Das stimmt nicht ganz. Anlagen spielen natürlich eine große Rolle, aber unsere Persönlichkeit – Fähigkeiten, Wissen, Erinnerungen und*

Charakter – sind das Ergebnis der Selbstorganisation unserer Körper und Gehirne in Reaktion auf unsere Erfahrungen. Das gilt auch für unsere gesundheitliche Verfassung. Ich persönlich habe zum Beispiel eine genetische Veranlagung für Diabetes 2, und vor über zwanzig Jahren erfuhr ich, dass ich unter dieser Krankheit leide. Heute habe ich jedoch keinerlei Beschwerden mehr, da es mir durch bewusste Ernährung, Sport und aggressive Behandlung mit Ergänzungsstoffen gelungen ist, meine Biochemie zu reprogrammieren. Auch unsere Gehirne sind unterschiedlich veranlagt, doch unsere tatsächlichen Begabungen sind ein Produkt von Gelerntem, Entwicklung und Erfahrung. Unsere Gene schaffen lediglich Tendenzen. Das kann man sich an der Entwicklung des Gehirns veranschaulichen: Der genetische Bauplan steckt lediglich bestimmte Regeln und Grenzen für neuronale Verbindungen ab, das Verknüpfungsmuster eines erwachsenen Menschen ist aber letztlich das Ergebnis eines selbstorganisierten Lernprozesses. Das Endergebnis, die Person, die wir sind, hängt sowohl von unserer Natur (den Genen) als auch unserer Erziehung (unseren Erfahrungen) ab.

Wenn wir also im Laufe unseres Leben unsere Gene verändern, so wird der Einfluss unserer ursprünglichen Gene dadurch keinesfalls ausgelöscht. Schließlich sind unsere Originalgene, bis zu dem Zeitpunkt, in dem wir sie verändern, die Grundlage der Verarbeitung unserer Erfahrungen und prägen somit entscheidend unsere Persönlichkeit. Man wird nicht über Nacht zum genialen Musiker, indem man sein Gehirn mit Genen für Musikalität versieht.

NEDD: Na gut, der Designer-Baby-Boomer entkommt seiner Natur nicht ganz. Aber Designer-Babys haben genug Zeit, um ihre künstlichen Gene vollständig zu entwickeln.

RAY: Die Entwicklung zu Designer-Babys wird eine Menge Zeit brauchen und in diesem Jahrhundert keine große Rolle spielen, weil sie von anderen Entwicklungen überholt wird. Die Technik für Designer-Babys wird noch zehn bis zwanzig Jahre brauchen und sich dann ganz allmählich durchsetzen. Weitere zwanzig Jahre dauert es, bis die Designer-Generation erwachsen ist, und bis dahin stehen wir kurz vor

der Singularität und die Revolution der künstlichen Intelligenz wird alles andere überschatten. Designer-Babys bedeuten nichts anderes als die Umprogrammierung von biologischen Informationsprozessen – doch sie sind immer noch biologisch und unterliegen entsprechenden Einschränkungen.

NEDD: *Du vergisst da etwas: Biologie ist, was uns ausmacht. Ich glaube, die meisten Leute würden zustimmen, dass biologisch zu sein ein ganz entscheidendes Merkmal des Menschen ist.*

RAY: *Momentan ist das sicher richtig.*

NEDD: *Und ich werde dafür sorgen, dass es dabei bleibt.*

RAY: *Wenn du für dich selbst sprichst, ist das ja auch völlig in Ordnung. Wenn du allerdings rein biologisch bleibst und deine Gene nicht reprogrammierst, wirst du dich nicht mehr allzu lange an der Debatte beteiligen können.*

Nanotechnik: Schnittmenge aus Information und physikalischer Welt

Das unendlich Kleine spielt eine unendlich große Rolle.

LOUIS PASTEUR

Ich schrecke jedoch nicht vor der finalen Frage zurück, ob wir, letztendlich, in einer großartigen Zukunft, die Atome nach unserem Willen anordnen; die Atome selbst, bis ins Letzte!

RICHARD FEYNMAN

Nanotechnik hat das Potential, die Leistungen der Menschheit zu erweitern, eine nachhaltige Versorgung mit Material, Wasser, Energie und Ernährung sicherzustellen, gegen unbekannte Bakterien und Viren zu schützen und (durch Schaffung von allgemeinem Wohlstand) die Gründe, den Frieden zu brechen, zu vermindern.

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION NANOTECHNOLOGY REPORT

Durch Nanotechnik wird es möglich, die physikalische Welt, einschließlich unserer Körper und Gehirne, neu zu gestalten, Molekül für Molekül – und potenziell Atom für Atom. Infolge des Gesetzes vom steigenden

Ertragszuwachs schrumpfen die technischen Strukturgrößen exponentiell, pro Jahrzehnt etwa um den Faktor vier in jeder Dimension.⁶⁸ In diesem Tempo erreichen die Strukturgrößen der meisten elektrischen und mechanischen Geräte bis Ende der 2020er den Nanobereich unterhalb von 100 Nanometern. (Elektronik unterschreitet diese Schwelle teilweise schon heute, jedoch noch nicht in Form von dreidimensionalen, selbstanordnenden Strukturen). Seit einigen Jahren entwickeln sich zudem Ideen und Konzepte, die das Zeitalter der Nanotechnik vorbereiten.

So wichtig die beschriebene biotechnische Revolution auch ist – sobald ihre Methoden ausgereift sind, wird man an die inhärenten Grenzen biologischer Systeme selbst stoßen. Biologische Systeme sind äußerst raffiniert aufgebaut, aber, wie wir wissen, bei Weitem nicht optimal. Wie wir gesehen haben, arbeitet das Gehirn mit sehr niedrigen Übertragungsgeschwindigkeiten. Weiter unten (siehe den Abschnitt „Nanobots in der Blutbahn“ auf [Seite 254](#)) beschreibe ich, wie rote Blutkörperchen durch tausendmal effizientere Nanoroboter ersetzt werden könnten.⁶⁹ Wenn biologische Abläufe vollständig erforscht sind, wird die Natur mit unseren technischen Errungenschaften nicht mehr mithalten können. Die Revolution der Nanotechnik wird uns jedoch ermöglichen, unsere Körper, unsere Gehirne und unsere Umwelt Molekül für Molekül umzugestalten und völlig neu zu erfinden.⁷⁰ Diese beiden Revolutionen werden zeitlich überlappen, Nanotechnik wird ihren Höhenpunkt allerdings erst etwa zehn Jahre nach der biotechnischen Revolution erreichen.

Als konzeptuelle Geburtsstunde der Nanotechnik gilt häufig Richard Feynmans geschichtsträchtige Rede „There’s Plenty of Room at the Bottom“*, in der er die Unausweichlichkeit und entscheidende Bedeutung von auf Atomebene gefertigten Maschinen beschreibt:

Meines Wissens spricht physikalisch nichts dagegen, Dinge Atom für Atom zu steuern. Prinzipiell können [...] Physiker jede chemische Substanz herstellen, die der Chemiker ihnen aufschreibt. [...] Wie? Ordne die Atome an, wie der Chemiker es sagt, und fertig ist die Substanz. Für die Probleme der Biologie und der Chemie wäre es von großer Hilfe, wenn unsere Fähigkeit, Dinge auf Atomebene zu tun und zu beobachten, zur vollständigen Reife gebracht würde – eine meines Erachtens unausweichliche Entwicklung.⁷¹

Eine noch frühere Konzeption von Nanotechnik stammt von John von Neumann. In den frühen 1950ern entwarf er ein selbstreplizierendes

System, bestehend aus einem universellen Konstruktor (einem Gerät, das beliebige physische Objekte erzeugen kann) und einem universellen Computer⁷²: Der Computer führt ein Programm aus, das den Konstruktor steuert, welcher auf diese Weise eine Kopie sowohl des Computers, einschließlich des Programms, als auch des Konstruktors erzeugt. Soweit ist die Beschreibung relativ abstrakt – Computer und Konstruktor könnten auf unterschiedlichste Weise realisiert werden oder aber mathematische Konstrukte bleiben. Von Neumann spricht jedoch von einem „kinematischen Konstruktor“: einem Roboter, der über mindestens einen Arm verfügt, um aus einem „Meer von Teilen“ ein Replikat seiner selbst anzufertigen.⁷³

Mitte der 1980er griff Eric Drexler diese beiden Ideen in seiner bahnbrechenden Dissertation auf und begründete damit das moderne Feld der Nanotechnik. Drexler beschreibt einen kinematischen Konstruktor in Von Neumanns Sinne, dem als Meer von Teilen Molekülfragmente und Atome dienen, wie Feynman in seiner Rede vorschlug. Drexlers Vision war so interdisziplinär und weitreichend, dass niemand wagte, die Betreuung seiner Arbeit zu übernehmen, abgesehen von meinem eigener Mentor Marvin Minsky. Drexlers Dissertation (aus welcher 1986 sein Buch *Engines of Creation* sowie 1992 eine technische Erläuterung in *Nanosystems* hervorging) stellte die Grundprinzipien der Nanotechnik und eine Road Map auf, die noch heute befolgt werden.⁷⁴

Drexlers „molekularer Assembler“ wird praktisch alles Erdenkliche herstellen können. Gelegentlich ist von einem „universellen Assembler“ die Rede; Drexler und andere Theoretiker meiden jedoch diesen Begriff, da die Produkte eines solchen Systems den Gesetzen der Physik und Chemie unterliegen und nur stabile Atomstrukturen beinhalten können. Zudem ist jeder Assembler auf ein bestimmtes Meer von Teilen festgelegt, selbst wenn es sich dabei potenziell um einzelne Atome handelt. Dennoch könnte ein Assembler so ziemlich jedes physikalische Gerät produzieren – einschließlich hocheffizienter Computer und Komponenten für andere Assembler.

Drexler lieferte keinen exakten Bauplan für einen Assembler – und auch heute gibt es einen solchen noch nicht. Drexlers Dissertation enthält jedoch

ausführliche Argumente für die Machbarkeit der Hauptkomponenten eines molekularen Assemblers. Diese Komponenten sind:

- Der *Computer*. Zuständig für die intelligente Steuerung der Fertigung. Er muss wie alle Komponenten klein und einfach sein. Drexler beschreibt ein vielversprechendes Konzept für einen mechanischen Computer mit molekularen „Riegeln“ anstelle von Transistoren. Ein solcher Riegel wäre sechzehn Kubiknanometer groß und könnte zehn Milliarden Mal pro Sekunde umschalten. Das übersteigt jede bekannte elektrische Technik – erst dreidimensionale Computer aus Kohlenstoffnanoröhren versprechen eine noch höhere Berechnungsdichte (in Operationen pro Gramm pro Sekunde).⁷⁵
- Die *Ansteuerung*: Drexler und sein Kollege Ralph Merkle schlagen eine SIMD-Architektur vor, bei der ein zentraler Datenspeicher die komplette Software enthält und einen Befehl nach dem anderen an Billionen von molekularen Assemblern gleichzeitig überträgt. Ich habe in **Kapitel 3** Einschränkungen von SIMD besprochen – für einen universellen Nanoassembler ist diese (sehr viel leichter als MIMD zu implementierende) Architektur jedoch ausreichend. Auf diese Weise muss nicht jeder Assembler das komplette Herstellungsprogramm kennen. Eine zentrale Steuerung ist auch sicherheitstechnisch zu begrüßen, da sie es vereinfacht, einen außer Kontrolle geratenen Selbstreplikationsprozess zu beenden.

Drexler bemerkt allerdings, dass sich ein Nanoassembler nicht notwendigerweise selbst replizieren muss.⁷⁶ Angesichts der inhärenten Gefahren von Selbstreplikation schlägt das Foresight Institute (eine von Eric Drexler und Christine Peterson gegründete Denkfabrik) ethische Richtlinien vor, die ungezügelter Selbstreplikation – insbesondere in natürlicher Umgebung – untersagen.

Wie ich in **Kapitel 8** näher besprechen werde, sollte diese Architektur genügend Absicherung gegen unabsehbare Pannen bieten – nicht jedoch gegen gezielte böswillige Einflussnahme.

- *Befehlsübermittlung*: Befehle der zentralen Steuereinheit würden bei einem elektrischen System durch elektrische Signale beziehungsweise in einem mechanischen System durch mechanische Vibrationen an die einzelnen Assembler übertragen.

- Der *Konstruktionsroboter*: Ein molekularer, einarmiger Roboter, ähnlich Von Neumanns kinematischem Konstruktor, nur viel kleiner. Es gibt bereits einige künstliche Systeme auf Molekularebene, die als Motoren und Roboterbeine dienen (siehe weiter unten).
- Der *Greifer des Roboterarms*: Drexlers Unternehmen *Nanosystems* hat eine Reihe von chemischen Konfigurationen entwickelt, die es dem Nanoroboter ermöglichen würden, mit der Spitze seines Arms (durch atomare Anziehungskräfte) Molekülfragmente und sogar einzelne Atome zu erfassen und an den gewünschten Ort zu befördern. Bei der chemischen Gasphasenabscheidung zur Erzeugung künstlicher Diamanten werden ebenfalls einzelne Kohlenstoffatome und Molekülfragmente durch chemische Reaktionen an andere Orte verschoben. Chemische Gasabscheidung ist ein chaotischer Prozess mit Billionen von Teilchen, doch Robert Freitas und Ralph Merkle entwickelten Ideen für Roboterarme, die einzelne Wasserstoffatome aus Verbindungen lösen und gezielt an einem anderen Ort platzieren können – und auf diese Weise molekulare Maschinen aus Diamantoiden herstellen könnten. Solches Material ist nicht nur extrem robust: Durch gezielte Dotierung mit winzigen Unreinheiten können daraus auch elektrische Komponenten wie Transistoren hergestellt werden. Zumindest Simulationen zufolge würden molekular gefertigte Maschinen (mit Getrieben, Schwenkarmen, Motoren und dergleichen) wie gewünscht funktionieren.⁷⁷ In letzter Zeit erregten insbesondere Kohlenstoffnanoröhren allgemeines Interesse, dreidimensional gefertigte, sechseckige Kohlenstoffgebilde, mit sowohl elektronischen als auch mechanischen Funktionen auf Molekularebene. Weiter unten stelle ich Beispiele bereits existierender molekularer Maschinen vor.
- Der *interne Bereich* des Assemblers muss vor Verunreinigungen geschützt werden, die den empfindlichen Fertigungsverfahren stören könnten. Drexler schlägt vor, ein Quasi-Vakuum zu schaffen und die äußeren Wände des Assemblers aus demselben Diamantoid-Material herzustellen, aus dem seine Produkte bestehen sollen.
- Die benötigte *Energie* kann entweder elektrisch oder chemisch bereitgestellt werden. Drexler beschreibt eine chemische Mischung, die zugleich die molekularen Baustoffe und den Brennstoff für die

Energiegewinnung enthält. Es gibt auch Vorschläge für Nanobrennstoffzellen mit Wasserstoff und Sauerstoff beziehungsweise Glukose und Sauerstoff, sowie für akustische Energieversorgung per Ultraschall.⁷⁸

Es gibt verschiedene Vorstellungen, wie ein molekularer Assembler auszusehen hat. Typischerweise wird darunter jedoch ein Haushaltsgerät verstanden, das beliebige Produkte erzeugen kann, für die eine Softwarebeschreibung existiert, seien es Computer, Kleidungsstücke, Kunstwerke oder gekochte Mahlzeiten.⁷⁹ Größere Produkte – Möbel, Autos oder gar Häuser – könnten stückweise oder mittels großer Assembler erzeugt werden. Die Herstellungskosten physikalischer Produkte, einschließlich von Assemblern selbst, beliefen sich auf den Preis des Rohmaterials. Drexler rechnet mit zehn bis fünfzehn Cents pro Kilo, unabhängig davon, ob man nun Bekleidung, parallelisierte Supercomputer oder zusätzliche Fertigungssysteme produziert.⁸⁰

Die Gesamtkosten würden hauptsächlich für Informationen anfallen: für die Beschreibung der Produkte beziehungsweise die Software, die den Herstellungsprozess steuert. Der Wert aller Dinge auf der Welt wäre von Information bestimmt. Von dieser Situation sind wir gar nicht so weit entfernt, denn der Informationsanteil von Produkten steigt rapide und nähert sich unbeirrbar der 100-Prozent-Asymptote an.

Die Entwicklung von Steuersoftware für molekulare Fertigung könnte wiederum automatisiert werden – ähnlich wie die Entwicklung von Computerchips. Chipentwickler bestimmen die Anordnung der Milliarden von Verbindungen und Komponenten nicht manuell, sondern erstellen abstrakte Spezifikationen, die durch CAD*-Systeme automatisch in Schaltpläne übersetzt werden. CAD ließe sich auch für die Softwareentwicklung für molekulare Fertigung einsetzen. So wäre letztlich ein schnelles Reverse Engineering physischer Produkte möglich: Anhand eines 3D-Scans des Zielgegenstandes könnte Software erzeugt werden, welche die Produktion von Replikaten steuert.

Der Fertigungsprozess sähe folgendermaßen aus: Der zentrale Datenspeicher sendet gleichzeitig Befehle an die Billionen (nach manchen Schätzungen bis zu 10^{18}) von Nanorobotern des Assemblers – alle Roboter erhalten dabei dieselben Befehle. Dabei erzeugt der Assembler anfänglich nur einige wenige Roboter, die er benutzt um immer mehr Roboter zu erzeugen, bis die benötigte Anzahl erreicht ist. Jeder Roboter verfügt über

einen kleinen Datenspeicher, in dem festgelegt ist, welche Aufgabe er erfüllt. Anhand dieser individuellen Daten werden die Anweisungen der zentralen Steuerung gefiltert und um lokale Parameter ergänzt. Dadurch können verschiedene Roboter unterschiedliche Teile konstruieren, obwohl sie dieselbe Befehlssequenz empfangen – vergleichbar mit der Genexpression in biologischen Systemen: jede Zelle verfügt über alle Gene, doch nur die für den jeweiligen Zelltyp relevanten Gene sind aktiv. Die Roboter entnehmen dem Rohmaterial je nach Bedarf Atome, Molekülfragmente und Brennstoff.

Der biologische Assembler

Die Natur lehrt uns, dass Moleküle Maschinen sind, denn alles Leben basiert auf molekularer Maschinerie. Enzyme sind molekulare Maschinen, die Verbindungen zwischen anderen Molekülen herstellen, unterbrechen oder neu organisieren. Muskeln werden von molekularen Maschinen betrieben, die Fasern ineinanderschieben. Die DNS dient als Datenspeicher, von dem die Ribosomen, molekulare Maschinen, die Proteine erzeugen, ihre Anweisungen empfangen. Aus diesen Proteinmolekülen wiederum bestehen die meisten molekularen Maschinen.

ERIC DREXLER

Der ultimative Existenzbeweis für molekulare Assembler ist das Leben selbst. Indem wir unser Verständnis der Informationsprozesse des biologischen Lebens vertiefen, stoßen wir auf neue Ideen für die Konzeption allgemeiner molekularer Assembler. Beispielsweise denkt man darüber nach, die molekulare Energiequelle von Zellen – Glukose und ATP – in Assemblern einzusetzen.

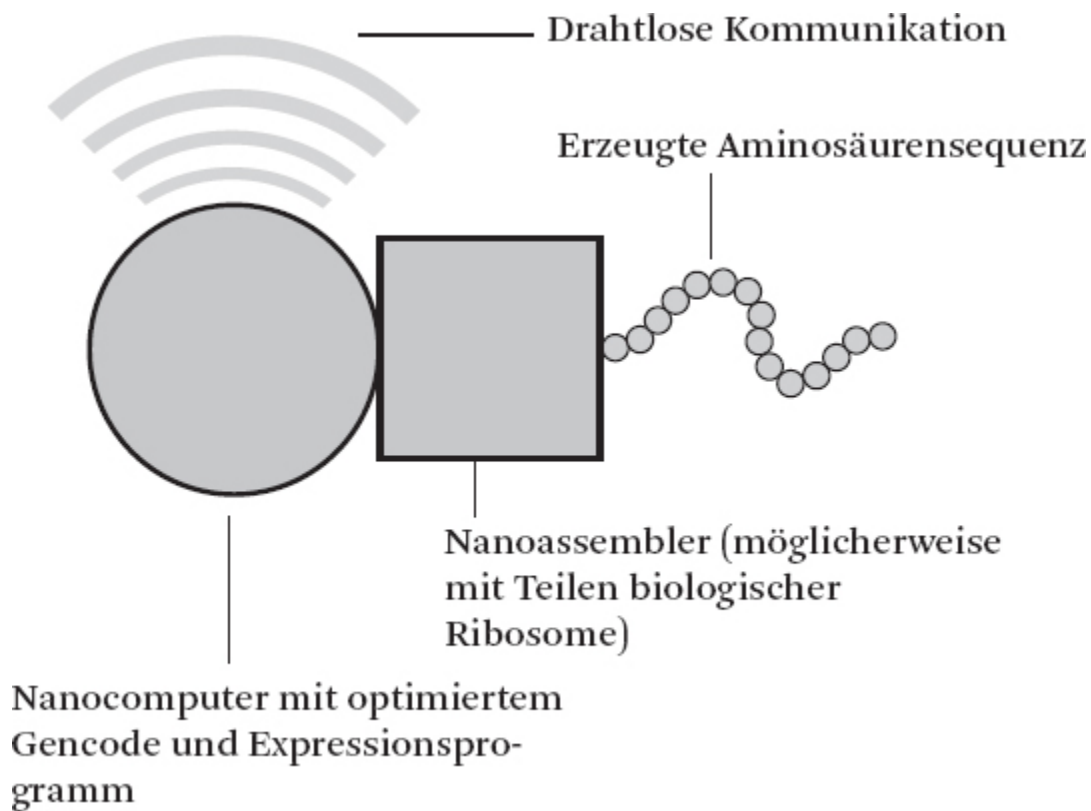
Für alle Probleme, die sich bei der Konstruktion eines Drexler-Assemblers stellen, hat die Natur bereits Lösungen gefunden. Ribosomen übernehmen die Aufgabe des Computers und des Konstruktors. Ein zentraler Datenspeicher ist nicht nötig, jede Zelle enthält den kompletten Gencode. Die Möglichkeit, die lokale Informationsspeicherung in Nanorobotern (durch zentrale Steuerung) zu minimieren, ist einer der Gründe, wieso Nanotechnik sehr viel sicherer als Biologie sein kann, insbesondere wenn es um Selbstreplikation geht.

Der lokale Datenspeicher des Lebens ist natürlich die DNS, unterteilt in Chromosomen und Gene. Als Befehlsschablone fungieren kurze RNS-Moleküle und Peptide, welche die Genexpression steuern (und Gene blockieren, die in der jeweiligen Zellart nichts verloren haben). Der interne Bereich, in dem die Ribosomen ihre Arbeit verrichten, besteht in der chemischen Lösung zwischen den Zellwänden, in der ein Säure-Basen-Gleichgewicht (etwa pH-Wert 7 bei Menschen) herrscht. Die Zellmembran schützt dieses System vor äußeren Einflüssen.

Zellkern-Upgrade durch Nanocomputer und Nanobot. Ein einfaches Prinzip, das sämtliche biologischen Erreger – mit Ausnahme von Prionen (selbstreplizierende, schädliche Proteine) – unschädlich machen könnte: In den 2020ern werden wir dank voll entwickelter Nanotechnik die Mittel haben, um die biologische Gendatenbank im Zellkern durch ein künstliches Nanosystem zu ersetzen, das den genetischen Code verwaltet und die Aufgaben der RNS, des Ribosoms und anderer Elemente des biologischen Assemblers übernimmt. Das Genom wäre dabei in einem Nanocomputer gespeichert, der die Prozeduren der Genexpression simuliert; ein Nanobot würde den selektierten Genen entsprechende Aminosäuresequenzen produzieren.

Dieser Mechanismus hätte bedeutende Vorteile. Mit der Anhäufung von DNS-Transkriptionsfehlern wäre eine Ursache des Alterns eliminiert. Die DNS könnte manipuliert, unsere Gene reprogrammiert werden (wie durch Gentherapie, nur direkter und flexibler). Zu guter Letzt könnten wir biologische Krankheitserreger (Bakterien, Viren und Krebszellen) ausschalten, indem wir die Replikation unerwünschter Gene verhindern.

Nanobot-Zellkern



Idealerweise ist ein solches System zentral steuerbar, sodass sich ungewünschte Replikationen gezielt unterbinden lassen und Krebsbildung, Autoimmunerkrankungen und andere Erkrankungen bekämpft werden können. Die meisten Krankheiten werden allerdings schon durch die im vorigen Abschnitt beschriebenen biotechnischen Methoden geheilt worden sein – Nanotechnik wird die letzten Hürden überwinden und ein durch reine Biologie unerreichbares Maß an Beständigkeit und Flexibilität schaffen.

Um die Aminosäurekette herzustellen, könnte der Nanoroboter sich den ribosomalen Mechanismus zunutze machen, der je eine an eine bestimmte tRNS gebundene Aminosäure loslöst und sie per Peptidbindung an die Kette anhängt. Genauer gesagt könnte das System einen Teil eines biologischen Ribosoms enthalten.

Doch molekulare Fertigung ist mehr als eine Imitation des biologischen Assemblers. Biologische Systeme sind an Proteine gebunden und somit von

begrenzter Stärke und Schnelligkeit. Proteine sind eine sehr eingeschränkte Klasse von Chemikalien, die – obwohl von letztlich dreidimensionaler Gestalt – aus eindimensionalen Aminosäuresträngen bestehen. Nanobots aus Getrieben und Drehkörpern wären darum tausendfach stärker und schneller als biologische Zellen.

Wenn es um Berechnung geht, ist die Ungleichheit noch viel größer: Die Schaltgeschwindigkeit von Nanoröhren wäre millionenfach höher als die der elektrochemischen Übertragung zwischen Säugetierneuronen.

Das oben beschriebene Konzept eines Diamantoid-Assemblers sieht ein einheitliches Ausgangsmaterial (Bau- und Kraftstoff in einem) vor. Was einen zusätzlichen Schutz gegen unkontrollierte Vermehrung von Nanobots in offenen Umgebungen darstellt. Auch der biologische Replikationsroboter, das Ribosom, benötigt ganz bestimmte Arbeitsmaterialien und Treibstoffe, die unser Verdauungssystem bereitstellt. Wenn sich die Nanotechnik weiterentwickelt werden jedoch Nanobots möglich, die Kohlenstoffatome aus allen möglichen organischen Verbindungen gewinnen und sich „in freier Wildbahn“ – jenseits einer kontrollierten Umgebung – vermehren können. Derartige Replikatoren sind ein großes Risiko, insbesondere angesichts ihrer überlegenen Robustheit und Schnelligkeit, und sorgen für eine kontroversenreiche Debatte, die ich **Kapitel 8** besprechen werde.

In dem Jahrzehnt, das seit der Veröffentlichung von *Nanosystems* vergangen ist, haben sich alle Aspekte von Drexlers Konzepten bestätigt, in Entwürfen, Supercomputersimulationen und insbesondere der Konstruktion konkreter molekularer Maschinen.⁸¹ Der Chemie-Professor T. Ross Kelly (Boston College) vermeldete, er habe einen chemisch angetriebenen Nanomotor aus siebenundzwanzig Atomen konstruiert.⁸² Eine Forschungsgruppe unter Carlo Montemagno baute einen ATP-betriebenen Nanomotor.⁸³ Ben Feringa (Universität von Groningen in den Niederlanden) baute einen solarbetriebenen Motor im Molekülformat aus achtundfünfzig Atomen.⁸⁴ Vergleichbare Fortschritte gibt es auch bei anderen molekularen Komponenten wie Getrieben, Drehkörpern und Hebeln. Durch chemische oder (nach Drexlers Idee) durch akustische Energie betriebene Systeme wurden erfolgreich beschrieben, simuliert und gebaut. Auch auf dem Gebiet

molekularer elektronischer Komponenten tut sich einiges, vor allem was Kohlenstoffnanoröhren betrifft.

Nanoröhren haben sich auch als vielseitige Strukturelemente erwiesen. Das Lawrence Berkeley National Laboratory präsentierte ein winziges, aus Nanoröhren bestehendes Förderband, das Indiumteilchen – und prinzipiell auch viele andere molekulare Objekte – transportieren kann.⁸⁵ Eine angelegte elektrische Spannung steuert dabei Richtung und Geschwindigkeit. „Man muss praktisch nur an einem Knopf drehen [...] und hat damit makroskopische Kontrolle über nanoskopischen Massentransport“, sagte einer der Entwickler, Chris Regan. „Und es ist umkehrbar: Durch Umpolen des Stroms können wir das Indium zurück an seine ursprüngliche Position befördern.“ Die präzise Beförderung molekülgroßer Objekte ist ein wichtiger Schritt in Richtung molekularer Fließbandfabrikation.

Selbstreplizierende Nanomaschinen sind realistisch – das hat eine im Auftrag der NASA durch General Dynamics durchgeführte Machbarkeitsstudie ergeben.⁸⁶ Die Wissenschaftler zeigten durch Computersimulationen, dass molekülgenaue Roboter, sogenannte kinematische zelluläre Automaten, sich selbst reproduzieren können. Auch in ihrem Szenario wurden die Nanobots zentral gesteuert.

Wie Nanoröhren kann auch die DNS vielseitige molekulare Strukturen bilden. DNS hat die Neigung, sich mit sich selbst zu verknüpfen, was sie zu einem nützlichen Strukturelement macht. Diese Eigenschaft lässt sich möglicherweise mit ihrer Funktion als Datenspeicher kombinieren. Sowohl Nanoröhren als auch DNS sind hervorragend sowohl für Informationsspeicherung und logische Schaltungen als auch für die Konstruktion stabiler dreidimensionaler Strukturen geeignet.

Eine Gruppe an der Ludwig-Maximilians-Universität München hat einen „DNS-Greifarm“ erschaffen, der ein bestimmtes Protein auswählen, binden und auf Kommando wieder loslassen kann.⁸⁷

Den Nanotechnikern Shiping Liao und Nadrian Seeman sind wichtige Schritte in Richtung eines dem Ribosom ähnlichen künstlichen DNS-Assemblers gelungen.⁸⁸ Das kontrollierte Greifen und Loslassen

molekularer Objekte ist eine weitere wichtige Voraussetzung für molekulare Fertigung.

Forscher des Scripps Research Institute haben DNS-Bauelemente erzeugt, indem sie zahlreiche Kopien eines 1.669 Nukleotide langen DNS-Strangs generierten, der an bestimmten Stellen Sequenzen aufwies, die zu sich selbst komplementär waren.⁸⁹ Diese Stränge ordneten sich eigenständig zu Oktaederblöcken an, aus denen sich komplizierte dreidimensionale Strukturen aufbauen lassen. Die Blöcke könnten auch als Transportcontainer für Proteine dienen. Gerald F. Joyce, einer der Forscher, spricht von einem „umgekehrten Virus“: Viren, ebenfalls selbstanordnend, haben gewöhnlicherweise Proteinhüllen mit DNS (oder RNS) im Inneren. „Hiermit könnte man im Prinzip die DNS außen und die Proteine innen haben“, erklärt Joyce.

Ein besonders eindrucksvolles Beispiel für DNS-basierte Nanomaschinen ist ein winziger Roboter, der sich auf zwei 10 Nanometer langen Beinen laufend fortbewegt.⁹⁰ Sowohl die Beine als auch die Laufbahn bestehen aus DNS; erneut ist deren Fähigkeit, sich gezielt zu verknüpfen und zu lösen, von Vorteil. Der laufende Nanobot, ein Projekt der Professoren Nadrian Seeman und William Sherman (New York University) löst ein Bein, bewegt sich nach vorn und befestigt das Bein wieder an der Unterlage. Das Projekt stellt unter Beweis, welche außerordentliche Präzision Nanomaschinen erreichen können.

Eine Möglichkeit Nanobots zu entwickeln, ist von der Natur zu lernen. Michael Simpson (Oak Ridge National Laboratory) beschreibt, wie wir Bakterien als „vorgefertigte Maschine[n]“ benutzen können. Bakterien sind natürliche Objekte im Format eines Nanobots, die sich fortbewegen, schwimmen und Flüssigkeiten pumpen können.⁹¹ Linda Turner (Rowland Institute in Harvard) beschäftigt sich vor allem mit den sogenannten Fimbrien: haarähnliche Zellfortsätze der Bakterien, die eine Reihe von Aufgaben erfüllen, unter anderem nanoskopische Objekte bewegen und Flüssigkeiten vermischen können. Auch einzelne Teile können eingesetzt werden. Eine Gruppe unter Viola Vogel (Washington University) entwickelte ein System, das Extremitäten der *E. coli*-Bakterie benutzt, um Nanokügelchen nach Größe zu sortieren. Das finale Ziel solcher Projekte

besteht darin, die Funktionsprinzipien der so vielseitigen Bakterien vollständig zu erforschen und auf künstliche Nanosysteme anzuwenden.

Fette, klebrige Finger

Während der raschen Entwicklung verschiedener Aspekte der künftigen Nanotechnik haben sich noch keine nennenswerten Schwachstellen in Drexlers Nanoassembler-Konzeption ergeben. Ein viel beachteter, in *Scientific American* publizierter Einwand des Nobelpreisträgers Richard Smalley beruhte auf einer verzerrten Darstellung von Drexlers Konzept und wurde den umfangreichen Arbeiten nicht gerecht, die während der letzten zehn Jahre auf diesem Gebiet entstanden waren.⁹² Smalley leistete Pionierarbeit mit Kohlenstoffnanoröhren und zeigte sich bezüglich vieler potenzieller Anwendungen der Nanotechnik zuversichtlich. Er schrieb: „Nanotechnik ist die Antwort, insofern es überhaupt Antworten gibt, auf unsere materiellen Bedürfnisse in Sachen Energie, Gesundheit, Kommunikation, Transport, Nahrung und Wasser“. Doch was molekulare Nanofertigung betrifft, ist Smalley äußerst skeptisch.

Nach Smalleys Beschreibung verfügen Drexlers Nanobots über fünf bis zehn „Finger“ (Arme) um einzelne Atome zu halten, zu bewegen und zu platzieren. Der enge Raum, auf dem die Nanobots agieren müssten, so Smalleys Einwand, biete jedoch keinen Platz für so viele Finger. (Smalley spricht vom Problem der „fetten Finger“). Des weiteren hätten die Roboter aufgrund atomarer Anziehung Probleme dabei, ihre Fracht wieder loszulassen (das Problem der „klebrigen Finger“). Smalley weist außerdem darauf hin, dass gewöhnliche chemische Reaktionen ein „kompliziertes Ballett“ mit fünf bis fünfzehn Atomen erfordern.

Doch diese Kritik geht völlig an Drexlers Ideen vorbei. Drexlers Konzept – und das der meisten darauf folgenden Beiträge – sehen nur einen einzigen „Finger“ pro Roboter vor. Außerdem gibt es ausführlich beschriebene und analysierte chemische Lösungen für den Transport von Atomen – keinesfalls müssen Atome dazu, wie mechanische Objekte, zwischen „klebrigen Fingern“ eingeklemmt werden. Neben den schon genannten Beispielen (wie dem „DNS-Greifarm“) sei noch die von Drexler

vorgeschlagene „Propargyl-Wasserstoffabspaltung“ erwähnt, deren Machbarkeit seither eingehend bestätigt wurde.⁹³ Ein weiterer Beleg für das Konzept sind das 1981 von IBM entwickelte Rastersondenmikroskop und das verbesserte Rasterkraftmikroskop, welche durch Reaktion der Messspitze mit Molekularstrukturen einzelne Atome gezielt platzieren können. An der Osaka University gelang es, per Rasterkraftmikroskop einzelne nicht-leitende Atome auf mechanische (anstatt auf elektrische) Weise zu bewegen.⁹⁴ Für die zukünftige Nanotechnik wird es nötig sein, sowohl leitende als auch nicht-leitende Atome bewegen zu können.⁹⁵

Wäre Smalleys Kritik zutreffend, so wäre keiner da, um sich Gedanken darüber zu machen: Leben, wie wir es kennen, wäre unmöglich, da der biologische Assembler genau das macht, was Smalley für unmöglich erklärt.

Smalley wendet zudem ein, dass ein Nanobot „Millionen von Jahren bräuchte, um auch nur kleinste Produktmengen zu erzeugen“. Für einen Assembler mit nur einem Nanobot ist das natürlich richtig, doch das Grundprinzip der Nanotechnik ist der Einsatz von Billionen von Nanobots – was auch der Grund für die viel diskutierten Sicherheitsbedenken ist. Die Herstellung so großer Mengen an Robotern zu vertretbaren Kosten macht nämlich Selbstreplikation unausweichlich. Dadurch entstehen potenziell große Gefahren, die ich in **Kapitel 8** besprechen werde. Die Natur setzt bei der Erschaffung von Organismen mit Billionen von Zellen ebenfalls auf Selbstvermehrung – und für praktisch jede Krankheit ist eine Fehlfunktion oder ein Missbrauch des Replikationssystems verantwortlich.

Schon früher wurden Zweifel an den Grundlagen der Nanotechnik geäußert, die erfolgreich widerlegt wurden. Kritiker wiesen darauf hin, dass Nanoroboter aufgrund von Wärmebewegungen einem ständigen Bombardement durch Kerne, Atome und Moleküle ausgesetzt wären. Dies ist einer der Gründe, weshalb Diamantoide oder Nanoröhren als Baustoff für Nanobots favorisiert werden – Materialien, die ausreichend hart und stabil sind, um thermischen Effekten zu widerstehen. Analysen haben gezeigt, dass solche Strukturen tausendfach hitzebeständiger sind als biologische Systeme und somit in einem viel größeren Temperaturbereich einsetzbar.⁹⁶

Die extrem geringe Strukturgröße von Nanomaschinen erregte auch Zweifel aufgrund der quantenmechanisch bedingten positionellen Unschärfe. Doch Quanteneffekte sind relevant, wenn es um einzelne Elektronen geht – ein Kohlenstoffatom ist jedoch über zwanzigtausend Mal schwerer als ein Elektron. Ein Nanobot wiederum besteht aus Millionen oder Milliarden von Kohlenstoffatomen. Setzt man diese Werte in quantenmechanische Gleichungen ein, so zeigt sich, dass die Unschärferelation zu vernachlässigen ist.⁹⁷

Eine weitere Herausforderung ist die Energieversorgung. Glukose-Sauerstoff-Brennzellen und vergleichbare Vorschläge schneiden in Machbarkeitsstudien (durch Freitas und andere) recht gut ab.⁹⁸ Glukose-Sauerstoff-Systeme haben den Vorteil, dass sie in nanomedizinischen Anwendungen direkt auf die Glukose-, Sauerstoff- und ATP-Reserven des Körpers zurückgreifen können. Vor Kurzem gelang der Bau eines aus Nickel bestehenden, durch ein ATP-Enzym angetriebenen Nanomotors.⁹⁹ Auch mit Wasserstoff-Brennzellen im Mikro- und Nanoformat gibt es Fortschritte – eine Alternative, die ich weiter unten besprechen werde.

Eine hitzige Debatte

Im April 2003 begegnete Drexler Smalleys Artikel mit einem offenen Brief, in dem er auf zwanzig Jahre eigene und anderer Leute Forschung verwies und insbesondere auf Smalleys Einwand der fetten und klebrigen Finger einging.¹⁰⁰ Wie gesagt war in Drexlers Konzept nie von Fingern die Rede, sondern vielmehr von reaktiven Molekülen. Drexler führt Enzyme und Ribosomen als natürliche Beispiele für molekulare Fertigung an und zitiert abschließend Smalley selbst: „Wenn ein Forscher etwas für möglich hält, unterschätzt er in der Regel, wie lange es dauern wird. Wenn er dagegen etwas für unmöglich hält, hat er wahrscheinlich unrecht.“

Im Lauf des Jahres 2003 ging die Debatte drei weitere Male hin und her. Smalley reagierte auf Drexlers offenen Brief, indem er die fetten, klebrigen Finger zurücknahm und anerkannte, dass Ribosomen und Enzyme tatsächlich genau die Art von molekularer Fertigung betreiben, die er zuvor ausgeschlossen hatte. Enzyme jedoch, argumentierte Smalley, müssten in

Wasser gelöst sein und seien somit auf biologische Strukturen wie „Holz, Fleisch und Knochen“ beschränkt. Auch das sei falsch, erwiderte Drexler.¹⁰¹ Viele Enzyme, selbst solche, die regulär in Wasser vorkommen, funktionierten auch in wasserfreien, organischen Lösungen, manche sogar im Trockenen mit gasförmigen Substraten.¹⁰²

Smalley behauptete weiterhin (ohne Nennung von Gründen oder Quellen), dass enzymatische Reaktionen nur mit biologischen Enzymen möglich seien und Wasser erforderten – doch auch dies ist ein Irrtum. Alexander Klibanov (Professor für Biologie und Chemie am MIT) demonstrierte bereits 1984 nichtaquatische (wasserfreie) enzymatische Katalyse. 2003 schrieb Klibanov: „[Smalleys] Äußerungen über nichtaquatische Enzymkatalyse sind eindeutig inkorrekt. Es gibt hunderte, wenn nicht tausende Arbeiten über nichtaquatische Enzymkatalyse seit unserer ersten Veröffentlichung von vor zwanzig Jahren.“¹⁰³

Es liegt auf der Hand, warum die Evolution auf einer wasserbasierten Chemie beruht. Wasser ist auf der Erde allgegenwärtig und macht 70 bis 90 Prozent unserer Körper, unserer Nahrung und überhaupt der gesamten Biomasse aus. Wasser hat starke dreidimensionale elektrische Eigenschaften, welche die chemischen Bindungen anderer Substanzen aufbrechen können. Wasser gilt als „ultimatives Lösungsmittel“, da es an den meisten biochemischen Reaktionen in unserem Körper beteiligt ist und die Chemie auf der Erde vorwiegend eine Wasserchemie ist. Unsere technische Entwicklung hat jedoch Systeme zum Ziel, die nicht den Beschränkungen einer wasser- und proteinbasierten Evolution unterworfen sind. Biologische Systeme können fliegen, doch zehn Kilometer hoch und Tausende Stundenkilometer schnell fliegt man nicht mit Proteinen, sondern mit moderner Technik. Biologische Systeme können sich Dinge merken und Kopfrechnen, doch um Milliarden von Informationseinheiten zu verarbeiten bedarf es elektrischer Technik anstelle eines nicht-unterstützten menschlichen Hirns.

Smalley ignoriert ein ganzes Jahrzehnt der Forschung an alternativen Methoden um Molekülfragmente durch präzise gesteuerte molekulare Reaktionen zu positionieren. Es gibt ausführlich erforschte Methoden um Diamantoide mit großer Präzision zu synthetisieren und beispielsweise

einzelne Wasserstoffatome von einer diamantartigen Oberfläche abzulösen¹⁰⁴ oder Kohlenstoffatome auf einer Oberfläche anzubringen.¹⁰⁵ Entsprechende Studien wurden unter anderem durchgeführt am Materials and Process Simulation Center des Caltech, dem Department of Materials Science and Engineering der North Carolina State University, dem Institute for Molecular Manufacturing der University of Kentucky, der U.S. Naval Academy und dem Xerox Palo Alto Research Center.¹⁰⁶

Smalley vermeidet es auch die wohlbekannte Rastersondenmikroskopie zu erwähnen, die auf exakt kontrollierten molekularen Reaktionen beruht. Darauf aufbauend beschreibt Ralph Merkle einen chemischen Nanobot-Arm, der bis zu vier Edukte reagieren lassen kann.¹⁰⁷ Es gibt massenhaft Literatur über ortsgenaue Reaktionen, die potenziell präzise steuerbar sind und somit als Werkzeuge für Nanobots in molekularen Assemblern geeignet sein könnten.¹⁰⁸ Neben dem Rastersondenmikroskop tauchen immer mehr Geräte auf, die zuverlässig Atome und Molekülfragmente manipulieren können.

Am 3. September 2003 beantwortet Drexler Smalleys Antwort auf den ursprünglichen Brief und verwies erneut auf die von Smalley missachtete umfangreiche Literatur.¹⁰⁹ Er zitierte den Vergleich mit einer modernen Fabrikanlage im Nanoformat sowie die Eyring-Theorie, nach welcher mit bestimmten Edukten positionsgenaue molekulare Reaktionen mit Megahertzfrequenzen möglich sind.

Smalley antwortete wiederum in einem Brief mit wenigen spezifischen Quellen und schwammigen Metaphern.¹¹⁰ So schrieb er beispielsweise: „Genauso wenig, wie man einen Mann und eine Frau dazu bringen kann, sich ineinander zu verlieben, indem man sie aneinanderdrückt, kann man präzise chemische Reaktionen zwischen zwei molekularen Objekten durch einfache mechanische Bewegung herbeiführen. [...] [Dafür] reicht es nicht aus, einfach zwei molekulare Objekte aneinanderzupappen.“ Smalley erkannte zwar wiederum an, dass Enzyme genau dazu eben doch in der Lage sind, beharrte jedoch darauf, dass dies nur innerhalb biologischer Systeme möglich sei. „Darum wollte ich die Diskussion auf [...] reale Chemie mit konkreten Enzymen lenken. [...] [E]in solches System benötigt ein flüssiges Medium. Für die uns bekannten Enzyme muss diese

Flüssigkeit Wasser sein, und mit Wasser können wir nicht viel mehr synthetisieren als Fleisch und Knochen im biologischen Rahmen.“

Smalley argumentiert nach dem Prinzip: „Es gibt heutzutage kein X, darum ist X unmöglich.“ Dieser Art von Denken begegnet man auch häufig, wenn es um künstliche Intelligenz geht. Kritiker sehen die Grenzen heutiger Systeme als Beweis für inhärente, unüberwindliche Beschränkungen und übersehen dabei die lange Liste marktreifer KI-Systeme (siehe den Abschnitt „Ausgewählte Beispiele für schwache KI“ auf [Seite 282](#)), die vor zehn Jahren noch den Status wissenschaftlicher Experimente hatten.

Man hat es schwer in Diskussionen als jemand, der versucht, fundierte Prognosen für die Zukunft zu erstellen. Einfacher ist es dagegen, Entwicklungen abzustreiten, die noch nicht eingetreten sind, auch wenn sie unausweichlich sind. Zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts vertraten einige Querdenker die Idee, dass Fluggeräte möglich seien, die schwerer als Luft sind. Den Skeptikern fiel es leicht zu widersprechen: Wenn Flugzeuge möglich waren, warum hatte dann noch niemand eines gebaut?

Am Ende seines letzten Briefes legt Smalley zumindest einen Teil seiner Beweggründe offen:

Vor einigen Wochen hielt ich einen Vortrag über Nanotechnik und Energie mit dem Titel „Sei ein Forscher, rette die Welt“ vor etwa 700 Schülern der Ober- und Mittelstufe des Spring Branch ISD, einem großen öffentlichen Schulsystem hier im Raum Houston. Als Auftakt zu meinem Besuch wurden die Schüler aufgefordert, ein Essay zum Thema „Warum bin ich ein Nanogeek?“ zu schreiben. Hunderte kamen dem nach und es war an mir, aus den besten dreißig Aufsätzen fünf auszuwählen, die mir am besten gefielen. Von den Aufsätzen, die ich las, ging fast die Hälfte davon aus, dass selbstreplizierende Nanobots möglich sind, und die meisten waren zutiefst besorgt, was passieren wird, wenn sich diese Nanobots in Zukunft auf der ganzen Welt ausbreiten. Ich tat, was ich konnte, um diese Ängste zu zerstreuen, doch zweifellos hat man vielen dieser Jugendlichen eine äußerst bedenkliche Gutenachtgeschichte erzählt.

Sie und ihre Anhänger haben unseren Kindern Angst eingejagt.

Meine Antwort an Smalley wäre, dass man früher auch die Möglichkeit weltumspannender Kommunikationsnetze und sich darüber verbreitender Computerviren bezweifelte. Heute haben wir es mit ebensolchen Netzen und entsprechenden Sicherheitsrisiken zu tun. Gleichzeitig mit den Computerviren entstand jedoch auch ein technisches Immunsystem – und unterm Strich ist der Nutzen der Technik sehr viel größer als ihre Tücken.

Smalley wählt einen falschen Ansatz, um die Bedenken der Menschen zu beschwichtigen. Indem er die Machbarkeit von Nanofertigung leugnet, leugnet er auch ihr Potenzial. Eine solche Einstellung ist letztendlich schädlich, da sie uns davon abhält, die Forschung in konstruktive Bahnen zu leiten. In den 2020ern wird Nanofertigung uns ermöglichen, die Armut zu bekämpfen, die Umwelt zu säubern, Krankheiten zu heilen, die menschliche Lebensspanne zu verlängern und viele andere lohnende Ziele zu erreichen. Doch wie jede andere Technik wird sie auch unserer destruktiven Ader völlig neue Möglichkeiten eröffnen. Umso wichtiger ist es, sachkundig an diese Technik heranzutreten, um von ihren Vorteilen zu profitieren, aber ihre Risiken zu meiden.

Die ersten Vorreiter

Drexler verstand unter Nanotechnik vornehmlich präzise Fertigung auf Molekularebene. Der Begriff hat sich jedoch ausgeweitet auf alle Techniken, bei denen entscheidende Strukturen nur eine geringe Anzahl an Nanometern (in der Regel unter hundert) groß sind. Während die Elektronik ohne großes Aufsehen in diesen Größenordnungsbereich geschlüpft ist, wurden auch für biologische und medizinische Anwendungen bereits Nanopartikel entwickelt, die bessere Tests und Behandlungen ermöglichen. Diese werden zwar bislang durch statistische Verfahren, und nicht durch molekulare Assembler, erzeugt, doch sie sind erste Beispiele für die Nutzbarmachung atomarer Effekte. Nanopartikel kommen beispielsweise als molekulare Markierungen in biologischen Tests zum Einsatz und ermöglichen eine genauere Erkennung von Proteinen und anderen Substanzen. Magnetische Nanopartikel, die an Antikörper binden, ermöglichen eine Untersuchung dieser Antikörper direkt im Körper mittels eines Magnetmessgeräts. Es gab auch erfolgreiche Experimente mit Goldnanopartikeln, die an DNS-Segmente binden und mit denen sich das Vorhandensein bestimmter Sequenzen testen lässt. Bestimmte Nanostrukturen, sogenannte Quantenpunkte, können mit einem Farbcode, ähnlich einem Strichcode, versehen werden, und dabei helfen, die Bewegung von Substanzen im Körper zu verfolgen.

Bald werden Mikrofluidik-Systeme verfügbar sein, die eine winzige Flüssigkeitsprobe in Nanokanälen Hunderten Tests gleichzeitig unterziehen können. Solche Geräte ermöglichen ausgiebige Untersuchungen von kaum sichtbaren Blutspuren.

Nanogerüste wurden erfolgreich eingesetzt, um biologisches Gewebe, wie beispielsweise Haut, zu züchten. In Zukunft könnte diese Technik helfen, beliebige Gewebearten für medizinische Behandlungen zu erzeugen.

Interessant sind Nanopartikel auch für den Transport von Substanzen zu bestimmten Orten im Körper. Nanopartikel können medizinische Wirkstoffe durch Zellwände hindurch und über die Bluthirnschranke hinweg gezielt ausliefern. Forscher der McGill University in Montreal präsentierten eine „Nanopille“ mit Strukturen zwischen 25 und 45 Nanometern – klein genug um durch die Zellwand zu schlüpfen und direkt auf die Zielstrukturen innerhalb der Zelle zu wirken.¹¹¹

Japanische Wissenschaftler kreierten aus je 110 Aminosäuremolekülen Nanogehäuse für Wirkstoffe. An jedem der Wirkstoffcontainer war ein Peptid befestigt, dass an bestimmte Stellen im menschlichen Körper bindet – in einem Experiment beispielsweise an menschliche Leberzellen.¹¹²

MicroCHIPS (Bedford, Massachusetts) hat ein computergesteuertes Implantat entwickelt, das unter der Haut sitzt und aus Hunderten Nanodrüsen einen genau abgestimmten Medikamenten-Mix absondert.¹¹³ Zukünftige Versionen sollen zudem in der Lage sein, den Gehalt bestimmter Substanzen, wie Glukose, im Blut zu messen. Das Gerät könnte als künstliche Bauchspeicheldrüse dienen, indem es wohldosierte, dem Blutzuckerspiegel angepasste Insulinmengen abgibt. Es könnte praktisch jedes hormonproduzierende Organ simulieren. Falls die klinischen Studien glatt laufen, könnte das System 2008 auf dem Markt sein.

Weitere innovative Ansätze: Goldnanopartikel können in einen Tumor bugsiert, durch Infrarotbestrahlung erhitzt, und die Krebszellen auf diese Weise zerstört werden. Nanoverpackungen für Wirkstoffe können diese geschützt durch den Verdauungstrakt hindurch zum Einsatzort transportieren und dort gezielt und sogar ferngesteuert freisetzen. Das Unternehmen Nanotherapeutics (Alachua, Florida) entwickelte zu diesem Zweck ein wenige Nanometer großes, biologisch abbaubares Polymer.¹¹⁴

Die Stromversorgung der Singularität

Wir produzieren derzeit weltweit etwa 14 Billionen (10^{13}) Watt Energie. Davon etwa 33 Prozent durch Öl, 25 Prozent durch Kohle, 20 Prozent durch Gas, 7 Prozent durch Atomkraft, 15 Prozent durch Biomasse und Wasserkraft und nur 0,5 Prozent durch nachhaltige Techniken wie Wind- und Solartechnik und Erdwärme.¹¹⁵ Der größte Teil der Luftverschmutzung und ein großer Teil der Wasserverschmutzung und anderen Belastungen resultieren aus der Förderung, dem Transport, der Verarbeitung und dem Verbrauch fossiler Brennstoffe. Öl ist fortwährend Auslöser geopolitischer Spannungen und unsere globale Stromrechnung beläuft sich auf horrenden zwei Billionen Dollar im Jahr. Zwar wird die Nanotechnik auch die Förderung, Umwandlung und Übertragung dieser Energieressourcen des Industriezeitalters effizienter gestalten, doch der Großteil unseres wachsenden Energiebedarfs muss zukünftig aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden.

Im Jahre 2030 wird die Preis-Leistung von Berechnung und Kommunikation gegenüber heute um einen Faktor von zehn zu einhundert Millionen gestiegen sein – andere technische Bereiche werden einen ähnlichen Zuwachs an Kapazität und Effizienz erfahren. Wie ich weiter unten besprechen werde, wird der Energiebedarf aufgrund der ebenfalls steigenden Energieeffizienz jedoch deutlich langsamer wachsen als die technischen Kapazitäten. Eine entscheidende Auswirkung der Nanotechnik besteht darin, dass physische Techniken, wie Fabrikation und Energieerzeugung, dem Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs unterworfen werden. Jede Technik, einschließlich Energie, wird dadurch zu Informationstechnik.

Schätzungen zufolge wird sich der Energiebedarf bis 2030 gerade mal verdoppeln, was in keinem Verhältnis zum Wirtschaftswachstum steht, ganz zu schweigen von den wachsenden technischen Leistungen.¹¹⁶ Der Großteil des zusätzlichen Bedarfs wird vermutlich durch Solarstrom, Windkraft und Erdwärme gedeckt werden. Wohlgemerkt sind genau genommen fast all unsere heutigen Energiequellen Formen von Solarenergie.

Fossile Brennstoffe sind nichts anderes als ehemals von Tieren, Pflanzen und dergleichen gespeicherte, und über Millionen von Jahren umgewandelte Sonnenenergie. (Wobei die Theorie, dass Fossilenergie von lebenden Organismen stammt, in jüngerer Zeit angezweifelt wurde). Doch die Ölförderung aus hochwertigen Vorkommen hat ihren Höhepunkt erreicht und nach Meinung mancher Experten bereits überschritten. Auf alle Fälle steht fest, dass leicht zugängliche Vorkommen fossiler Ressourcen bald aufgebraucht sein werden. Es existieren noch sehr viel mehr fossile Reserven – zum Beispiel Ölschiefer –, die jedoch neue Techniken erforderlich machen, um eine effiziente und saubere Förderung zu gewährleisten. Auch diese Quellen werden eine Rolle in unserem künftigen Energiehaushalt spielen. Das derzeit im Bau befindliche, Milliarden teure Modellkraftwerk namens FutureGen soll das erste emissionsfreie Fossilkraftwerk der Welt werden.¹¹⁷ Anstatt auf gewöhnliche Weise Kohle zu verbrennen, wird in diesem 275-Megawatt-Kraftwerk Kohle zunächst in ein synthetisches Wasserstoff-Kohlenmonoxid-Gas umgewandelt, welches mit Wasserdampf reagiert, wodurch Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid entstehen. Diese beiden Gase werden getrennt, wobei der Wasserstoff in Brennstoffzellen oder zur direkten Energiegewinnung eingesetzt werden kann. Die Schlüsseltechnik der Anlage besteht in neuartigen Membranen zur Trennung von Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid.

Der Fokus wird jedoch auf der Entwicklung sauberer, erneuerbarer, dezentraler und sicherer Energiequellen mithilfe von Nanotechnik liegen. Während der letzten Jahrzehnte befand sich unsere Energietechnik im flachen Bereich der S-Kurve, in jenem späten Stadium, in dem sich das Paradigma asymptotisch seiner Leistungsgrenze annähert. Die nanotechnische Revolution wird neue Energiequellen erfordern, sie wird in den 2020ern aber auch neue S-Kurven in allen Bereichen der Energietechnik – Erzeugung, Speicherung, Übertragung und Verbrauch – ermöglichen.

Lasst uns beim Verbrauch anfangen. Dank der Möglichkeit, durch Nanotechnik Materie und Energie auf Atomebene zu manipulieren, wird die Energieeffizienz deutlich steigen und der Verbrauch abnehmen. Im Verlauf der nächsten Jahrzehnte wird die Rechnertechnik zu reversibler Berechnung

übergehen. (Siehe „Grenzen der Berechnung“ in **Kapitel 3**). Wie zuvor beschrieben, beschränkt sich der Energieverbrauch bei Berechnung mit reversiblen Logikgattern fast ausschließlich auf die Korrektur von durch Wärme- und Quanteneffekte entstandenen Fehlern. Folglich kann reversible Berechnung den Energieverbrauch potenziell um einen Faktor von einer Milliarde reduzieren. Außerdem werden Logikgatter und Speicherbits um mindestens den Faktor Zehn in jeder Dimension kleiner werden, was den Energieverbrauch um einen weiteren Faktor Tausend verringert. Mit voll entwickelter Nanotechnik werden die Energiekosten pro Bitzustandsänderung darum auf etwa ein Billionstel gesunken sein. Natürlich wird unser Energiebedarf noch schneller steigen als die Effizienz, doch diese enorme Verbrauchssteigerung wird durch die erhöhte Effizienz zumindest einigermaßen gezügelt werden.

Molekulare Fertigung wird ebenfalls um ein Vielfaches effizienter sein als unsere heutigen Fabriken, in denen große Materialmengen auf sehr ineffektive Weise von Ort zu Ort bewegt werden. In heutigen Fertigungsprozessen werden zudem große Energiemengen für die Herstellung von Rohmaterialien wie Stahl aufgewendet. Eine Nanofabrik dagegen wird in einem Gerät bestehen, das man sich auf den Tisch stellen kann und das alles Mögliche von Computern bis hin zu Kleidung produzieren kann. Für größere Produkte (Fahrzeuge, Häuser oder auch zusätzliche Nanofabriken) werden einzelne Module erzeugt und durch größere Roboter zusammengefügt. Entstehende Wärme, die den Großteil des Energiebedarfs von Nanofertigung ausmacht, wird aufgefangen und recycelt werden.

Der Energieverbrauch von Nanofabriken ist vernachlässigbar. Drexler glaubt, Nanofertigung werde eher Energie *generieren* als *verbrauchen*: „Ein molekularer Fertigungsprozess kann durch die chemische Energie des Rohmaterials betrieben werden und elektrische Energie als Nebenprodukt erzeugen (wenn auch nur, um die Wärmeentwicklung einzudämmen). [...] Unter der Annahme, dass das typische organische Rohmaterial zum Einsatz kommt und überschüssiger Wasserstoff oxidiert wird, ist ausreichend effiziente molekulare Fertigung unterm Strich ein Energieproduzent.“¹¹⁸

Die Produkte können aus neuen Nanoröhren- und Nanokompositwerkstoffen aufgebaut werden; die energieintensive Herstellung von Stahl, Titan und Aluminium würde dadurch vermieden. Was Beleuchtung betrifft, werden kleine, kalte LEDs, Quantenpunkte und andere innovative Lichtquellen die heißen, ineffizienten Glühlampen ersetzen.

Funktionalität und Wert gefertigter Waren werden zunehmen – nicht jedoch die Produktgröße. (In manchen Fällen, insbesondere bei Elektronik, werden die Produkte kleiner werden). Der höhere Wert wird sich hauptsächlich durch den immer wertvolleren Informationsgehalt der Produkte ergeben. Zwar wird sich die Deflationsrate von 50 Prozent für Informationsprodukte weiterhin halten, sie wird jedoch durch das Wachstum der Menge an wertvollen Informationen mehr als ausgeglichen werden.

In Kapitel Zwei habe ich den Effekt des Gesetzes vom steigenden Ertragszuwachs bezüglich Kommunikation und Information besprochen. Die Menge übermittelter Informationen wird weiter exponentiell wachsen, doch die Effizienz von Kommunikation wird fast ebenso schnell wachsen, weshalb der Energiebedarf für Kommunikation nur langsam steigen wird.

Auch die Übertragung von Energie wird effizienter werden. Heute bleibt eine Menge Energie durch Wärmeentwicklung in den Stromleitungen und beim Transport von Kraftstoffen auf der Strecke. Smalley war – trotz seiner Kritik an molekularer Fertigung – stets ein großer Vertreter neuer, auf Nanotechnik basierender Paradigmen der Energieerzeugung und -übertragung. Er beschrieb lange Stromleitungen aus Kohlenstoffnanoröhren, die robuster, leichter und vor allem energieeffizienter sind als konventioneller Kupferdraht.¹¹⁹ Smalley zufolge könnten zudem effizientere, supraleitende Materialien Aluminium und Kupferdrähte in Elektromotoren ersetzen. Smalleys Zukunftsvision einer Nanoenergietechnik umfasst eine ganze Palette neuer Techniken:¹²⁰

- Photovoltaik: Senkung der Kosten für Solarkollektoren um den Faktor Zehn bis Hundert.
- Wasserstoffherzeugung: neue, effiziente Technik zur Produktion von Wasserstoff aus Wasser und Sonne.

- Wasserstoffspeicherung: leichte, stabile Materialien zur Speicherung von Wasserstoff in Brennstoffzellen.
- Brennstoffzellen: Senkung der Kosten für Brennstoffzellen um den Faktor Zehn bis Hundert.
- Batterien und Superkondensatoren für Energiespeicherung: Steigerung der Speicherdichte um den Faktor Zehn bis Hundert.
- Effizienzsteigerung von Transportmitteln wie Autos und Flugzeugen durch robuste, leichte Nanomaterialien.
- Robuste, leichte Materialien für große Energiekollektoren im All und auf dem Mond.
- Nanoelektronik für Roboter mit künstlicher Intelligenz zur Installation ebensolcher Energiekollektoren.
- Neue Ummantelungen für Bohrköpfe für tiefe Ölbohrungen.
- Nanokatalysatoren für effizientere Kohleverbrennung bei sehr hohen Temperaturen.
- Nanorußfilter für Kohleförderung. Ruß besteht vorwiegend aus Kohlenstoff, dem Grundmaterial der Nanotechnik.
- Neue Materialien für die Nutzbarmachung von starken geothermischen Energiequellen (Umwandlung von Erdwärme in Energie).

Eine weitere Möglichkeit für die Energieübertragung ist der drahtlose Transport über Mikrowellen. Diese Methode wäre insbesondere geeignet, um Energie von riesigen Solarkollektoren im Weltall auf die Erde zu transferieren (siehe unten).¹²¹ Das Millenium-Projekt des American Council for the United Nations University sieht in Mikrowellenübertragung einen wichtigen Aspekt für eine „Zukunft mit zulänglicher, sauberer Energie“.¹²²

Energiespeicherung ist derzeit stark zentralisiert, was ein Sicherheitsrisiko darstellt, denn Flüssiggastanks und andere Speichieranlagen sind ein leichtes Ziel für terroristische Angriffe mit verheerenden Auswirkungen. Gleichmaßen gefährdet sind Tanklaster und Öltanker. Das neue Paradigma der Energiespeicherung sind Brennstoffzellen, die sich letztendlich breit über unsere Infrastruktur verteilen werden. Hier haben wir also ein weiteres Beispiel für die Entwicklung von ineffizienten und verwundbaren zentralisierten Einrichtungen hin zu effizienten und stabilen verteilten Systemen.

Brennstoffzellen mit aus Methanol (und anderen sicheren wasserstoffreichen Kraftstoffen) gewonnenem Wasserstoff haben in den letzten Jahren starke Fortschritte gemacht. Integrated Fuel Cell Technologies, ein kleines Unternehmen in Massachusetts, präsentierte Brennzellen-Mikrosysteme: Geräte im Briefmarkenformat, bestehend aus Tausenden mikroskopisch kleinen Brennstoffzellen sowie Kraftstoffleitungen und Steuerelektronik.¹²³ NEC plant, in näherer Zukunft Brennstoffzellen auf Nanoröhrenbasis für Laptops und andere tragbare Elektronik einzuführen.¹²⁴ Das Unternehmen kündigte an, seine kompakten Energiequellen würden Laufzeiten von bis zu vierzig Stunden möglich machen. Auch Toshiba arbeitet an Brennstoffzellen für tragbare Elektronik.¹²⁵

Auch mit größeren Brennstoffzellen für Geräte, Fahrzeuge und sogar Häuser gibt es beachtliche Fortschritte. Das U.S. Department of Energy kommt in einem Bericht von 2004 zu dem Schluss, dass Nanotechnik alle nötigen Voraussetzungen für ein wasserstoffgetriebenes Auto bereitstellen könnte.¹²⁶ Beispielsweise wäre durch Materialien aus Nanoröhren oder Nanokompositstoffen ein Wasserstofftank realisierbar, der einerseits leicht genug ist, aber andererseits dem hohen Druck standhalten kann. Der Bericht spricht von Brennstoffzellen, die doppelt so effizient sind wie Benzinmotoren und ausschließlich Wasserdampf als Abgas produzieren.

Die meisten Pläne für Brennstoffzellen setzen mittlerweile auf Methanol als Lieferant von Wasserstoff, welcher dann mit Sauerstoff aus der Luft zu Wasser reagiert, wobei Energie entsteht. Methanol ist allerdings giftig und leicht entflammbar, also ein Sicherheitsrisiko. Forscher der St. Louis Universität entwickelten eine stabile Brennstoffzelle, die gewöhnliches Ethanol (Trinkalkohol) benutzt.¹²⁷ Darin spaltet ein Enzym namens Dehydrogenase Wasserstoffionen von den Alkoholmolekülen ab, welche wiederum mit Sauerstoff reagieren und Energie erzeugen. Angeblich funktioniert diese Zelle mit jeder Art von trinkbarem Alkohol. Nick Akers, ein an dem Projekt beteiligter Student: „Wir haben es mit verschiedenen Alkoholsorten probiert. Kohlensäurehaltiges Bier und Wein mochte die Zelle nicht so recht, aber alles andere hat gut funktioniert.“

Forscher der University of Texas entwickelten eine Brennstoffzelle von der Größe eines Nanobots, welche Energie direkt mithilfe der Glukose-Sauerstoff-Reaktion im menschlichen Blut erzeugt.¹²⁸

Die Zelle mit dem Spitznamen „Vampirbot“ produziert ausreichend Energie für gewöhnliche Elektronik und könnte als Energiequelle für zukünftige Nanobots in der Blutbahn dienen. Japanische Forscher mit einem ähnlichen Projekt schätzen, dass ihr System mit dem Blut eines Menschen eine theoretische Spitzenleistung von einhundert Watt erreichen könnte, und das, obwohl Implantate deutlich weniger verbrauchen würden. (Eine Zeitung aus Sydney merkte an, dass damit die Grundlage geschaffen wäre, um Menschen wie in *Matrix* als Batterien zu benutzen).¹²⁹

Ein anderer Ansatz besteht darin, Zucker aus der Natur in Elektrizität umzuwandeln. Swades K. Chaudhuri und Derek R. Lovley (University of Massachusetts) bauten eine Zelle, die mithilfe von Mikroben (der Bakterie *Rhodospirillum rubrum*) einen Wirkungsgrad von stolzen 81 Prozent erreicht und im Leerlauf fast keine Energie verbraucht. Die Bakterie gewinnt Energie direkt aus Glucose, ohne instabile Zwischenprodukte. Die Bakterien können sich zudem mithilfe des Zuckers reproduzieren, wodurch eine stabile, kontinuierliche Energieerzeugung gewährleistet ist. Das Experiment gelang auch mit anderen Zuckern wie Fruktose, Saccharose und Xylose. Brennstoffzellen könnten entweder echte Bakterien enthalten oder die chemische Reaktion, die die Bakterien durchführen, direkt implementieren. Solche Techniken könnten nicht nur Nanobots mit Energie aus Blutzucker versorgen, sondern auch Strom aus industriellem und landwirtschaftlichem Abfall gewinnen.

Nanoröhren können als winzige Batterien fungieren und sind eine potenzielle Konkurrenz für Brennstoffzellen.¹³⁰ Dies ist eine weitere der bemerkenswert vielfältigen Funktionen von Nanoröhren, neben hocheffizienter Berechnung, Kommunikation, Stromübertragung und extrem stabilen Werkstoffen.

Die vielversprechendste Einsatzmöglichkeit von Nanomaterialien zur Energiegewinnung ist die Solartechnik, die potenziell den Großteil unseres Energiebedarfs auf nachhaltige, emissionsfreie und dezentrale Weise bedienen kann. Sonnenlicht ist kostenlos, und die etwa 10^{17} Watt, die die

Sonne auf die Erde strahlt – das Zehntausendfache der weltweit derzeit verbrauchten 10^{13} Watt –, sollten für unsere Zwecke mehr als ausreichend sein.¹³¹ Aufgrund der gesteigerten Effizienz durch Nanotechnik wird unser Energiekonsum, wie zuvor erwähnt, trotz massivem Zuwachs in Berechnung, Kommunikation und Wirtschaft insgesamt, bis 2030 nur moderat anwachsen, auf etwa dreißig Billionen Watt (3×10^{13}). Diese

Energiemenge könnten wir komplett bereitstellen, indem wir nur drei Zehntausendstel (0,0003) der auf die Erde fallenden Sonneneinstrahlung auffangen.

Zum Vergleich: Der Stoffwechsel aller Menschen zusammen erzeugt nach Robert Freitas' Schätzung 10^{12} Watt und die Vegetation der Erde 10^{14} Watt. Die Energiemenge, die wir produzieren und verbrauchen können, ohne das globale Energiegleichgewicht der derzeitigen Ökologie zu stören (Klimatologen sprechen vom „hypsithermalen Limit“), schätzt Freitas auf 10^{15} Watt – genug für eine beträchtliche Anzahl von Nanobots pro Person für Intelligenzenerweiterung und medizinische Zwecke sowie andere Zwecke wie Energieerzeugung und Säuberung der Umwelt. Bei einer angenommenen Weltbevölkerung von zehn Milliarden (10^{10}) kämen laut Freitas innerhalb dieses Energielimits 10^{16} (zehn Billionen) Nanobots auf jeden Menschen.¹³² Schon 10^{11} Nanobots pro Person (zehn Millionstel des Maximums) reichten aus, um einen Nanobot an jedem Neuron zu platzieren.

Zu dem Zeitpunkt, an dem die Nanotechnik einen solchen Umfang erreicht, wird es auch möglich sein, zumindest einen großen Teil der durch Nanobots und andere Maschinen erzeugten Wärme abzufangen und wieder in Energie umzuwandeln. Das Effektivste wäre wohl, wenn das Energierecycling direkt in die Nanobots selbst mit eingebaut wäre¹³³ – vergleichbar mit reversiblen Logikgattern, die die Wärme, die bei einer Rechenoperation entsteht, praktisch unmittelbar recyceln.

Wir könnten zudem Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre filtern, um Kohlenstoff für unsere Nanomaschinen zu gewinnen, und auf diese Weise die durch unsere derzeitige Industrie verursachte CO_2 -Belastung bereinigen. Das sollten wir allerdings nicht übertreiben, da wir es sonst mit einer Auskühlung der Erde zu tun bekommen.

Bislang waren Solarmodule recht ineffizient und kostspielig, doch die Technik verbessert sich rasch. Die Effizienz bei der Umwandlung von Sonnenstrahlung in Strom in Silikon-Solarzellen ist zwischen 1952 und 1992 von 4 auf 24 Prozent gestiegen.¹³⁴ Aktuelle mehrschichtige Zellen schaffen es auf 34 Prozent. Neue Studien mit Nanokristallen für die Umwandlung von Sonnenenergie deuten darauf hin, dass eine Effizienz von über 60 Prozent erreichbar ist.¹³⁵

Solarstrom kostet derzeit geschätzt \$2,75 pro Watt.¹³⁶ Mehrere Unternehmen arbeiten an Nanosolarzellen und hoffen die Kosten unter den Preis anderer Energiequellen drücken zu können. Mit einem Preis unter \$1,00 pro Watt wäre Solarenergie, industriellen Überlegungen zufolge, eine wettbewerbsfähige Quelle für das nationale Stromnetz. Nanosolar hat ein Konzept mit Titaniumoxid-Nanopartikeln, die auf sehr dünnen, biegsamen Oberflächen massenhaft produzierbar sind. Martin Roscheisen, Leiter des Unternehmens, schätzt, dass diese Technik den Preis für Solarenergie bis 2006 auf fünfzig Cent pro Watt senken kann.¹³⁷ Die Konkurrenten Nanosys und Konarka haben ähnliche Prognosen. Ob diese Pläne aufgehen oder nicht – sobald wir über molekulare Nanofertigung verfügen, können wir Solarmodule (und fast alles andere) extrem günstig produzieren, das heißt, praktisch zu den Materialkosten. Bei einer anzunehmenden Dicke von wenigen Mikrometern könnte man schließlich Solarmodule für einen läppischen Penny pro Quadratmeter herstellen. Die meisten menschengemachten Oberflächen, Gebäude, Autos und sogar Kleidung, könnten mit effizienten Solarkollektoren versehen werden. Somit sollte eine solare Ausbeute von 0,0003 der Gesamteinstrahlung relativ kostengünstig realisierbar sein.

Die Solartechnik auf der Erde könnte durch große Kollektoren im Weltraum ergänzt werden. Die NASA hat bereits einen „Space Solar Power“-Satelliten ausgearbeitet, der Sonnenlicht in Elektrizität umwandelt und diese durch Mikrowellen auf die Erde sendet. Ein jeder solcher Satellit könnte Milliarden von Watt einbringen und Zehntausende Haushalte versorgen.¹³⁸ Um 2029 könnten wir mittels Nanofertigung riesige Solarkollektoren direkt in der Erdumlaufbahn konstruieren. Dazu müsste lediglich das Rohmaterial auf eine Raumstation gelangen, möglicherweise

durch den geplanten Weltraumfahrstuhl: ein schmales Band aus Kohlenstoffnanoröhrenkomposit, das von einer Raumstation herabhängt, welche durch ein Gegengewicht jenseits des geostationären Orbits in der Umlaufbahn gehalten wird.¹³⁹

Auch Kernfusion für den Hausgebrauch ist nicht völlig ausgeschlossen. Indem sie eine Flüssigkeit durch Ultraschall in Schwingung versetzten, komprimierten Forscher des Oak Ridge National Laboratory Gasbläschen soweit, dass darin die Temperatur auf mehrere Millionen Grad anstieg, Wasserstoffkerne fusionierten und Energie freigesetzt wurde.¹⁴⁰ Trotz der breiten Kritik an den ersten Beschreibungen von kalter Fusion im Jahre 1989 wurde diese Ultraschallmethode von einigen Gutachtern positiv aufgenommen.¹⁴¹ Jedoch ist noch zu wenig über diese Technik bekannt – über ihre Tauglichkeit als zukünftige Energiequelle lässt sich daher bislang nur spekulieren.

Nanotechnik und Umwelt

Nanotechnik verspricht, sich enorm positiv auf die Umwelt auszuwirken. Neue Fertigungs- und Verarbeitungstechniken werden zum einen Schadstoffemissionen drastisch reduzieren. Zum anderen werden die Altlasten der jetzigen Industrieära bereinigt werden. Die eben beschriebene Deckung unseres Energiebedarfs aus erneuerbaren, sauberen Quellen wird dabei natürlich einen wichtigen Schritt darstellen.

Neue, auf molekularer Ebene erzeugte Substanzen und Geräte werden nicht nur kleiner sein, sondern völlig neue elektrische, chemische und biologische Eigenschaften aufweisen. Nanotechnik wird unser Arsenal an Katalysatoren, chemischen und atomaren Klebebindungen und mechanischen Verfahren deutlich erweitern, ganz zu schweigen von intelligenter Steuerung durch verbesserte Mikroelektronik.

Letztendlich werden wir all unsere industriellen Prozesse so umstellen, dass wir die gewünschten Erfolge erzielen, während wir ihre negativen Auswirkungen, wie die Freisetzung unerwünschter Abfallprodukte, minimieren. Eine ähnliche Entwicklung haben wir im vorherigen Abschnitt im Zusammenhang mit Biotechnik besprochen: intelligent konzipierte

pharmazeutische Wirkstoffe für gezielte biochemische Eingriffe mit minimalen Nebenwirkungen. Tatsächlich wird die gezielte nanotechnische Erzeugung von Molekülen auch die biotechnische Revolution vorantreiben.

Die derzeitige Nanoforschung dreht sich um relativ einfache Strukturen wie Nanopartikel, Moleküle in Nanobeschichtungen oder Nanoröhren. Nanopartikel bestehen aus zehn bis tausend Atomen, sind in der Regel kristalliner Natur und werden durch kristallogische Verfahren gezüchtet, da wir noch nicht die Möglichkeiten für präzise molekulare Fertigung besitzen. Nanostrukturen bestehen aus mehreren, selbstanordnenden Schichten. Solche Strukturen werden typischerweise durch Wasserstoff- und Kohlenstoffbindungen und andere atomare Kräfte zusammengehalten. Natürliche Beispiele für mehrschichtige Nanostrukturen sind Zellmembranen und die DNS.

Wie alle neuen Techniken haben auch Nanopartikel eine Kehrseite: die Entstehung neuartiger Giftstoffe und andere unvorhersehbare Einflüsse auf Leben und Umwelt. Durch Elektroschrott gelangen bereits viele Giftstoffe wie Galliumarsenid in die Ökosysteme. Dieselben Eigenschaften, durch welche Nanopartikel und Nanoschichten wünschenswerte Effekte erzielen, können unerwünschte Reaktionen in biologischen Systemen, wie Nahrungsmitteln und dem menschlichen Körper, hervorrufen. In manchen Fällen werden solche Stoffe zwar durch bestehende Richtlinien erfasst, doch das breite Feld unerforschter Auswirkungen gibt Grund zur Besorgnis.

Dennoch gibt es bereits Hunderte Projekte zur Verbesserung industrieller Abläufe, die explizit auf die Reduzierung von Verschmutzung ausgerichtet sind. Einige Beispiele:

- Ausgiebig geforscht wird an Nanopartikeln, die diverse Umweltgifte binden, deaktivieren, unschädlich machen und beseitigen sollen. Oxidations- und Reduktionsmittel und andere aktive Substanzen können erwiesenermaßen eine Vielzahl von unerwünschten Stoffen umwandeln. Lichtaktivierte Nanopartikel (unter anderem Formen von Titandioxid und Zinkoxid) sind selbst relativ ungiftig und können organische Schadstoffe binden und eliminieren.¹⁴² Zinkoxid-Nanopartikel sind insbesondere starke Katalysatoren für die Unschädlichmachung von Chlorphenolen. Diese Nanopartikel sind

sowohl Indikatoren als auch Katalysatoren und können so konzipiert werden, dass sie gezielt nur mit den jeweiligen Schadstoffen reagieren.

- Nanofiltrationsmembranen ermöglichen eine deutlich verbesserte Wasserreinigung von Kleinstpartikeln, verglichen mit den Absatzbecken konventioneller Kläranlagen. Nanopartikel für gezielte Katalyse können Verunreinigungen absorbieren und beseitigen. Die Nanopartikel können durch magnetische Trennung herausgefiltert und wiederverwendet werden; somit werden sie nicht selbst zu Verunreinigung. Eines von vielen Beispielen ist die Entwicklung molekularer Siebe aus Aluminosilikaten für die kontrollierte Oxidation von Kohlenwasserstoffen (wie die Umwandlung von Toluol in ungiftiges Benzaldehyd).¹⁴³ Das Verfahren benötigt weniger Energie und vermindert ineffiziente Photoreaktionen sowie die Menge an Abfallprodukten.
- Geforscht wird auch an nanoproduzierten kristallinen Materialien zur Katalyse und Katalyseunterstützung in der chemischen Industrie. Solche Katalysatoren können Reaktionserträge vermehren, giftige Nebenprodukte verringern und den Reinheitsgrad erhöhen.¹⁴⁴ Die Ölindustrie setzt beispielsweise das Material MCM-41 ein, um ultrafeine Kontaminationen zu bereinigen, für die andere Verfahren nicht ausreichen.
- Der breite Einsatz von Nanokompositen beim Bau von Autos würde den jährlichen Spritverbrauch Schätzungen zufolge um 1,5 Milliarden Liter im Jahr verringern, was wiederum die CO₂-Emissionen um fünf Milliarden Kilogramm im Jahre senken würde – neben anderen Umweltentlastungen.
- Nanoroboter können beim Umgang mit Atommüll helfen. Bei der Aufbereitung von Brennelementen können Nanofilter Isotope trennen. Nanoflüssigkeiten können die Kühlung von Kernreaktoren verbessern.
- Bei der Beleuchtung in Haushalten und Industrie könnten durch Nanotechnik Strom und jährlich schätzungsweise zweihundert Millionen Tonnen CO₂-Emissionen eingespart werden.¹⁴⁵
- Herstellung und Einsatz selbstanordnender Elektronik (beispielsweise aus selbstorganisierten Biopolymeren) wird, einmal ausgereift, weniger Energie benötigen und weniger giftige

Nebenprodukte erzeugen als konventionell gefertigte Halbleitertechnik.

- Feldemissionsbildschirme („field-emission displays“, FEDs) mit Nanoröhrentechnik werden bessere Leistungen bieten und dabei auf Schwermetalle und andere Schadstoffe konventioneller Bildschirme verzichten.
- Bimetallische Nanopartikel (wie Eisen/Palladium oder Eisen/Silber) bieten sich als Reduktionsmittel und Katalysatoren für PCBs, Pestizide und halogenierte organische Lösungen an.¹⁴⁶
- Nanoröhren scheinen Dioxine deutlich besser zu absorbieren als gewöhnlicher Kohlenstoff.¹⁴⁷

Dies ist nur eine kleine Auswahl aktueller, dem Umweltschutz zuträglicher Forschungsprojekte. Sobald wir nicht mehr nur auf relativ einfache Nanopartikel und Nanoschichten beschränkt sind und in präziser Nanofertigung komplexe Systeme konstruieren können, werden wir über eine Armee von winzigen, intelligenten Robotern verfügen, die auch kompliziertere Aufgaben für uns bewältigen können. Zu diesen Aufgaben wird mit Sicherheit auch die Säuberung der Umwelt zählen.

Nanobots in der Blutbahn

Die Nanotechnologie hat uns die Werkzeuge in die Hand gegeben, um mit dem ultimativen Baukasten der Natur zu spielen – Atome und Moleküle... Die Möglichkeiten, neue Dinge zu kreieren, scheinen grenzenlos.

NOBELPREISTRÄGER HORST STRÖMER

Wozu nanomedizinische Eingriffe letztendlich führen, ist eine dauerhafte Aussetzung des biologischen Alterns sowie eine Verringerung des biologischen Alters auf jede beliebige, vom Patienten gewünschte Stufe. Solcherlei Eingriffe werden in einigen Jahrzehnten Standard sein. Durch jährliche Untersuchungen und Behandlungen und gelegentliche größere Reparaturmaßnahmen könnte das biologische Alter einmal im Jahr auf das gewünschte, mehr oder weniger konstante physiologische Alter zurückgesetzt werden. Unglückliche Zufälle können einen immer noch das Leben kosten, doch man wird mindestens zehn Mal länger leben als heute.

ROBERT A. FREITAS JR.¹⁴⁸

Ein Paradebeispiel für die Anwendung präziser molekularer Fertigung wird der Einsatz von Milliarden oder Billionen von Nanobots, winzigen Robotern, sein, die in unserem Blutkreislauf mitreisen. Das mag nach Zukunftsmusik klingen, doch dieses Konzept wurde im Mikrobereich in Tierversuchen bereits erfolgreich erprobt. Mindestens vier größere BioMEMS*-Konferenzen befassen sich mit Geräten zum Einsatz in der menschlichen Blutlaufbahn.¹⁴⁹

Es folgen einige Nanobot-Konzepte, die infolge von Miniaturisierung und Kostenreduktion in fünfundzwanzig Jahren umsetzbar sein werden. Diese Nanobots werden nicht nur das menschliche Gehirn erkunden und ein Reverse Engineering desselben ermöglichen, sondern eine breite Vielfalt an diagnostischen und therapeutischen Funktionen erfüllen.

Robert A. Freitas Jr. – Vordenker der Nanotechnik, führender Entwickler von Nanomedizin (Überarbeitung des biologischen Systems durch molekulare Technik) und Autor eines entsprechenden Buches¹⁵⁰ – hat Roboter entwickelt, die menschliche Blutzellen ersetzen können und hundert- bis tausendfach leistungsfähiger sind. Mit diesen sogenannten Respirozyten könnte ein olympischer Läufer fünfzehn Minuten sprinten, ohne Luft zu holen.¹⁵¹ Freitas' „Mikrobivoren“, künstliche Fresszellen, werden Krankheitserreger sehr viel effektiver bekämpfen als unsere weißen Blutkörperchen.¹⁵² Seine DNS-Reparaturroboter könnten Transkriptionsfehler ausbessern und sogar gewünschte Veränderungen der DNS vornehmen. Weitere von Freitas entwickelte medizinische Roboter könnten als Putzkommando dienen und unerwünschte Abfallstoffe und Chemikalien (wie Prionen, missgebildete Proteine und Protofibrillen) aus den Zellen entfernen.

Freitas liefert detaillierte Konzepte für eine breite Palette medizinischer Nanobots (wie er sie zu bezeichnen pflegt) sowie einen Katalog von Lösungsansätzen für die diversen Herausforderungen bei ihrer Entwicklung. So beschreibt er ein Dutzend Konzepte für kontrollierte, steuerbare Fortbewegung,¹⁵³ die teilweise auf biologischen Prinzipien, wie beweglichen Zilien, basieren. Näheres dazu im nächsten Kapitel.

George Whitesides bemängelt in der Zeitschrift *Scientific American*: „Für Nanoobjekte entstünde, selbst wenn man sie mit einem Propeller versehen

könnte, ein neues, schwerwiegendes Problem: zufällige Irritationen durch Wassermoleküle. Diese Moleküle sind zwar kleiner als ein Nano-U-Boot, aber nicht so viel kleiner.“¹⁵⁴ Doch Whitesides‘ Kritik basiert auf falschen Annahmen. Sämtliche geplanten medizinischen Nanobots, einschließlich derer von Freitas, sind mindestens zehntausend Mal größer als ein Wassermolekül. Analysen durch Freitas und andere zeigen, dass die Brownsche Molekularbewegung keine signifikanten Auswirkungen hätte. Medizinische Nanobots wären vielmehr tausendmal stabiler und präziser als Blutzellen und Bakterien.¹⁵⁵

Es sei auch darauf hingewiesen, dass medizinische Nanobots sich, anders als biologische Zellen, nicht mit Stoffwechselprozessen wie Verdauung und Atmung herumschlagen müssen. Ebenso wenig brauchen sie biologische Reproduktionssysteme zu unterstützen.

Freitas‘ Ideen greifen einige Jahrzehnte voraus, doch es gibt bereits merkliche Fortschritte mit Apparaten in der Blutbahn. Forscher der University of Illinois in Chicago gelang es, in Ratten Typ-1-Diabetes zu heilen, indem sie Inselzellen durch Nanotechnik ersetzten.¹⁵⁶ Sie entwickelten Geräte mit sieben Nanometer großen Poren, die Insulin freisetzen und die Zerstörung durch Antikörper verhindern. Zahlreiche innovative Projekte dieser Art befinden sich auf dem Weg.

MOLLY 2004: *Okay, dann paddeln also diese ganzen Robos durch mein Blut. Was bringt mir das noch, außer, dass ich stundenlang die Luft anhalten kann?*

RAY: *Die Nanobots werden dich gesund halten, indem sie Krankheitserreger zerstören: Bakterien, Viren und Krebszellen. Dabei vermeiden sie gewisse Stolpersteine des natürlichen Immunsystems, wie Autoimmunreaktionen. Und wenn dir nicht passt, was die Nanobots treiben, kannst du ihnen – anders als dem Immunsystem – einfach neue Anweisungen geben.*

MOLLY 2004: *Cool, kann ich ihnen eine E-Mail schreiben? „Liebe Nanobots, bitte hört auf die Bakterien in meinem Magen zu killen, die brauche ich noch zum Verdauen“?*

RAY: *Ja, gutes Beispiel. Die Nanobots werden ständig unter Kontrolle sein und miteinander und mit dem Internet verbunden sein. Es gibt jetzt schon Neuroimplantate, zum Beispiel für Parkinsonpatienten, die sich direkt mit neuer Software bespielen lassen.*

MOLLY 2004: *Das macht Computerviren gleich viel gefährlicher, oder? Wenn ich jetzt einen Virus habe, installiere ich neu und lade ein Backup, aber wenn die Nanobots in meinem Blut einen Virus haben, zerstören sie vielleicht meine Blutzellen!*

RAY: *Ein weiteres Argument für künstliche Blutzellen, aber du hast schon recht. Das Problem ist aber kein neues – selbst im Jahr 2004 hängen Intensivstationen, Notrufsysteme, Kernkraftwerke, Flugzeuge und Waffensysteme von Software ab. Schon heute entscheidet Softwareintegrität über Leben und Tod.*

MOLLY 2004: *Das stimmt, aber die Vorstellung, dass mein eigener Körper von Software abhängig ist, gefällt mir trotzdem nicht so recht. Auf meinem PC bekomme ich über hundert Spam-Mails, und ein Teil davon enthält immer Viren. Ich hätte ein ungutes Gefühl, wenn das auch bei den Nanobots in meinem Körper passiert.*

RAY: *Du denkst dabei zu sehr an das Internet von vor zehn Jahren. Durch VPNs, abgeschottete Netzwerke, können wir schon heute sichere Firewalls aufbauen, ansonsten wären Softwarelösungen für*

missionskritische Aufgaben gar nicht denkbar. Das Internet ist mittlerweile relativ sicher und wird immer sicherer werden.

MOLLY 2004: *Da sind aber manche Leute anderer Meinung, was die Sicherheit von Firewalls betrifft.*

RAY: *Klar, sie sind nicht perfekt und werden es niemals sein, aber es sind noch ein paar Jahrzehnte hin, bevor Software in unseren Körpern und Gehirnen im großen Stil zum Einsatz kommt.*

MOLLY 2004: *Aber die Hacker werden auch immer besser.*

RAY: *Es wird ein Kopf-an-Kopf-Rennen bleiben, keine Frage. Aber die Vorteile sind eindeutig größer als die Risiken.*

MOLLY 2004: *Ist das so eindeutig?*

RAY: *Naja, niemand würde ernsthaft fordern, dass wir wegen Computerviren das Internet abstellen.*

MOLLY 2004: *Okay, das stimmt.*

RAY: *Und wenn die Nanotechnik ausgereift ist, wird sie unsere ganzen biologischen Probleme lösen. Schluss mit biologischen Pathogenen, Giftstoffen, Genfehlern und Altern. Dafür werden sie neue Probleme mit sich bringen, so wie mit dem Internet die Computerviren kamen. Zu den neuen Problemen gehört die Gefahr, dass selbstreplizierende Nanotechnik außer Kontrolle gerät oder die Steuersoftware für die verteilten Nanobots versagt.*

MOLLY 2004: *Sagtest du „Schluss mit Altern“?*

RAY: *Ganz recht, das ist einer der Nutzen.*

MOLLY 2004: *Wie wollen die Nanobots das denn machen?*

RAY: *Das werden wir schon mit Biotechnik schaffen, beispielsweise destruktive Gene durch RNS-Interferenz ausschalten, durch Gentherapie das Erbgut anpassen, Zellen und Gewebe durch therapeutisches Klonen regenerieren, den Stoffwechsel durch zielgenaue Wirkstoffe reprogrammieren und vieles mehr. Wo die Biotechnik nicht ausreicht, muss die Nanotechnik ran.*

MOLLY 2004: *Wo denn zum Beispiel?*

RAY: *Nanobots werden sich durch die Blutbahn und in und um Zellen bewegen können und dabei diverse Aufgaben erfüllen, beispielsweise*

Giftstoffe entfernen, Abfallstoffe abtransportieren, Genfehler beheben, Zellmembranen reparieren, Arteriosklerose bekämpfen, die Hormon- und Neurotransmitterkonzentrationen anpassen und vieles mehr. Durch Nanobots können wir den Alterungsprozess umkehren, und zwar auf der Ebene von Zellen, Zellkomponenten und einzelnen Molekülen.

MOLLY 2004: *Dann bleibe ich ewig jung?*

RAY: *Das ist der Plan.*

MOLLY 2004: *Hm. Wann hast du gesagt, kriege ich die Dinger?*

RAY: *Ich dachte, du machst dir Sorgen wegen der Firewall?*

MOLLY 2004: *Ach, darüber kann ich mir später Gedanken machen. Also wie ist der Zeitplan?*

RAY: *So zwanzig bis fünfundzwanzig Jahre dürfte es noch dauern.*

MOLLY 2004: *Okay, ich bin fünfundzwanzig, das heißt also ich bleibe dann für immer fünfundvierzig?*

RAY: *Nein, das trifft es nicht ganz. Mit unserem heutigen Wissen können wir den Alterungsprozess auf ein Schneckentempo verlangsamen. In zehn bis zwanzig Jahren können wir ihn dank der biotechnischen Revolution vollends zum Stillstand bringen und in vielen Fällen sogar umzukehren. Und auch bis dahin herrscht ja kein Stillstand: mit jedem Jahr entwickeln wir bessere Technik und die Entwicklung beschleunigt sich. Die Nanotechnik wird dann die letzte Vollendung bringen.*

MOLLY 2004: *„Beschleunigung“, natürlich. Du sagst ja kaum einen Satz, in dem das Wort nicht vorkommt. Also welches biologische Alter werde ich dann erreichen?*

RAY: *Ich schätze mal, du wirst dich so bei Mitte dreißig einpendeln und eine Weile dabei bleiben.*

MOLLY 2004: *Mitte dreißig klingt ganz gut. Ein bisschen reifer als fünfundzwanzig darf es schon sein. Aber was meinst du mit „eine Weile dabei bleiben“?*

RAY: *Das Aufhalten und die Umkehrung des Alterns ist erst der Anfang. Nanobots für Gesundheit und Lebensverlängerung sind nur eine frühe Phase des Einzugs der Nanotechnik in unsere Körper und Gehirne. Durch Nanobots, die miteinander und mit unseren Neuronen*

kommunizieren, werden wir – und das ist die eigentlich wichtige Implikation – unser Denken erweitern. Sobald nichtbiologische Intelligenz in unserem Gehirn Fuß gefasst hat, wird unsere Intelligenz vom Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs erfasst und wächst exponentiell an. Unser biologisches Denken ist dagegen gewissermaßen eine Sackgasse.

MOLLY 2004: Schon wieder dieses Gesetz. Aber wenn das wirklich alles so eintritt, werden unsere biologischen Neuronen ja gar keine große Rolle mehr spielen.

RAY: Das könnte man so sagen.

MOLLY 2004: Na, Molly aus der Zukunft, wann habe ich meinen biologischen Körper aufgegeben?

MOLLY 2104: Willst du wirklich, dass ich dir die Zukunft verrate? Außerdem macht die Frage so gar keinen Sinn.

MOLLY 2004: Warum denn nicht?

MOLLY 2104: In den 2040ern waren wir in der Lage, Teile von uns, ob biologisch oder künstlich, in Sekundenschnelle neu zu erschaffen. Es wurde klar, dass unser wahres Selbst in einem Informationsmuster besteht, das sich zwar physisch manifestieren muss, aber seine physische Form schnell verändern kann.

MOLLY 2004: Wie das?

MOLLY 2104: Durch molekulare Nanofertigung in Hochgeschwindigkeit – dadurch konnten wir unsere physische Instanz jederzeit schnell verändern. Mal hatte ich einen biologischen Körper, dann nicht mehr, dann hatte ich doch wieder einen, und so weiter.

MOLLY 2004: Ok, ich glaube ich hab's begriffen.

MOLLY 2104: Der Punkt ist, ich kann mein biologisches Gehirn und meinen alten Körper jederzeit zurückhaben. Nichts, was wir ablegen, ist für immer verloren.

MOLLY 2004: Also holst du ihn auch 2104 noch manchmal zurück?

MOLLY 2104: Manche Leute tun das, aber das ist eher eine Spielerei. Ich meine, biologische Simulationen sind absolut nicht mehr

unterscheidbar von der „realen“ Natur, wozu also noch physische Manifestationen?

MOLLY 2004: *Echte Körper sind recht umständlich, was?*

MOLLY 2104: *Das kann man sagen.*

MOLLY 2004: *Ich finde die Vorstellung komisch, meine Form ändern zu können. Wo bleibt denn da die Beständigkeit?*

MOLLY 2104: *Die ist seit 2004 nicht weniger geworden. Die Teilchen, aus denen du jetzt bestehst, werden auch ständig ausgetauscht. Beständig ist nur dein Informationsmuster.*

MOLLY 2004: *Aber 2104 könnt ihr doch auch euer Informationsmuster blitzschnell verändern. Das tue ich zum Beispiel nicht.*

MOLLY 2104: *So groß ist der Unterschied nicht. Auch dein Muster verändert sich mit der Zeit: deine Erinnerungen, Fähigkeiten und deine Persönlichkeit. Doch es gibt eine gewisse Beständigkeit, einen Kern, der sich nur ganz langsam ändert.*

MOLLY 2004: *Aber ich dachte du kannst mit einem Wimpernschlag deine komplette Persönlichkeit und dein ganzes Auftreten verändern?*

MOLLY 2104: *Ja, aber das ist nur die Oberfläche. In meinem tiefsten Inneren verändere ich mich auch nicht schneller als damals, im Jahr 2004.*

MOLLY 2004: *Nun gut, es gibt viele Gelegenheiten, in denen ich ganz froh wäre mein äußeres Erscheinungsbild augenblicklich ändern zu können.*

Robotik: Starke KI

Betrachten wir ein weiteres Argument von Turing. Bisher haben wir nur relativ simple, berechenbare Dinge hergestellt. Wenn wir die Komplexität unserer Maschinen vergrößern, wird es vielleicht ein paar Überraschungen geben. Er zieht den Vergleich zu einem Kernreaktor. Unterhalb einer „kritischen“ Masse passiert recht wenig, doch wenn die kritische Masse überschritten wird, fliegen die Funken. So auch bei Gehirnen und Maschinen. Die meisten Gehirne und alle Maschinen sind bislang „unterkritisch“: Ihre Reaktionen auf äußere Reize sind eintönig und uninteressant, sie haben keine eigenen Ideen. Doch einige Gehirne, und möglicherweise zukünftige Maschinen sind überkritisch und aus sich heraus brillant. Turing legt nahe, dass dies nur eine Frage der Komplexität ist und ab einem gewissen Level eine qualitative Veränderung auftritt, weshalb „überkritische“ Maschinen sehr verschieden sein werden von dem, was wir bisher gesehen haben.

J. R. LUCAS, OXFORDER PHILOSOPH, IN SEINEM ESSAY „MINDS, MACHINES AND GÖDEL“ (1961)¹⁵⁷

Angenommen Superintelligenz wird eines Tages technisch möglich – werden die Menschen sie auch wirklich bauen wollen? Diese Frage darf wahrscheinlich bejaht werden. Jeder Schritt in Richtung Superintelligenz ist mit großen wirtschaftlichen Vorteilen verbunden. Die Computerindustrie investiert riesige Summen in neue Hardware- und Softwaregenerationen und wird damit weitermachen, solange es Wettbewerbsdruck und Profitmöglichkeiten gibt. Die Leute wollen bessere Computer und schlaudere Software und sie wollen die Möglichkeiten dieser Maschinen ausschöpfen. Bessere Medikamente, Erlösung von langweiligen oder gefährlichen Tätigkeiten, Unterhaltung – die Liste an Vorteilen für die Konsumenten ist endlos. Auch das Militär hat großes Interesse an künstlicher Intelligenz. Und nirgendwo auf dem Weg gibt es einen natürlichen Zäsurpunkt, an dem Technophobiker sagen könnten: „bis hierher und nicht weiter.“

NICK BOSTROM, „HOW LONG BEFORE SUPERINTELLIGENCE“ (1997)

Es ist schwer vorstellbar, dass Superintelligenz nicht jedes Problem lösen oder uns zumindest bei der Lösung helfen kann. Krankheiten, Armut, Umweltzerstörung, unnötiges Leid aller Art: alles Ärgernisse, die eine mit Nanotechnik ausgerüstete Superintelligenz beseitigen könnte. Eine Superintelligenz könnte uns zudem ermöglichen, unbegrenzt zu leben, entweder, indem sie den Alterungsprozess durch Einsatz von Nanomedizin stoppt und umkehrt, oder, indem sie uns erlaubt, uns selbst hochzuladen. Eine Superintelligenz könnte uns auch die Möglichkeit geben, unsere eigenen intellektuellen und emotionalen Fähigkeiten deutlich zu erweitern, und sie könnte uns dabei helfen, eine höchst ansprechende Erfahrungswelt zu kreieren, in welcher wir unsere Zeit damit verbringen können, uns an Spielen zu erfreuen, uns mit Mitmenschen auszutauschen, Erfahrungen zu sammeln, unsere Persönlichkeit zu entfalten und nach unseren Idealen zu streben.

NICK BOSTROM, „ETHICAL ISSUES IN ADVANCED ARTIFICIAL INTELLIGENCE“ (2003)

Werden Roboter die Erde erben? Ja, aber es wird sich dabei um unsere Kinder handeln.

MARVIN MINSKY (1995)

Von den drei Revolutionen, die zur Singularität führen (G, N und R), wird Revolution R die extremste sein: die Erschaffung nichtbiologischer Intelligenz, welche die menschliche übersteigt. Intelligentere Prozesse verdrängen grundsätzlich Prozesse von geringerer Intelligenz, weshalb Intelligenz die stärkste Kraft des Universums ist.

Das „R“ in GNR steht für Robotik, doch der entscheidende Faktor ist starke KI (künstliche Intelligenz, die menschliche übersteigt). Dass in diesem Zusammenhang dennoch von „Robotik“ die Rede ist, wird gemeinhin damit begründet, dass Intelligenz einen Körper – eine physische

Präsenz – benötigt, um auf die Welt einzuwirken. Ich denke jedoch, physische Verkörperung wird dabei überbewertet, und halte Intelligenz für den springenden Punkt. Intelligenz findet immer einen Weg, die Welt zu beeinflussen, und schafft sich ihre eigenen Mittel der Verkörperung und der physischen Manipulation. Außerdem können wir physische Fähigkeiten als grundlegenden Teil unserer Intelligenz betrachten, so ist beispielsweise ein großer Teil unseres Gehirns (das Kleinhirn, das über die Hälfte der Nervenzellen ausmacht) mit motorischen Abläufen und Muskelkoordination befasst.

Künstliche Intelligenz, die alle menschlichen Fähigkeiten besitzt, wird menschlicher Intelligenz aus mehreren Gründen weit überlegen sein. Wie zuvor besprochen, können Maschinen ihr Wissen untereinander sehr schnell weitergeben. Als nicht-unterstützte Menschen sind wir dagegen nicht in der Lage, die Erfahrungen, das Wissen und die Fähigkeiten auszutauschen, die in unseren neuronalen Verknüpfungsmustern und Neurotransmitterverteilungen kodiert sind – außer durch das schwerfällige, langsame Medium sprachlicher Mitteilung. Auch diese Kommunikationsmethode hat uns natürlich große Dienste geleistet: Sie unterscheidet uns von anderen Tieren und war eine der Grundvoraussetzungen für die technische Entwicklung.

Menschliche geistige Fähigkeiten haben sich nur entwickelt, wenn sie evolutionär sinnvoll waren. Diese Fähigkeiten basieren größtenteils auf massiv parallelisierter Mustererkennung und ermöglichen uns beispielsweise Gesichter zu unterscheiden, Objekte zu identifizieren und sprachliche Laute zu erkennen. Für viele andere Arten von Mustern – beispielsweise in Finanzdaten – sind sie jedoch ungeeignet. Sobald wir die Prinzipien der Mustererkennung vollständig erforscht haben, werden Maschinen diese auf jede Art von Daten und Muster anwenden können.¹⁵⁸

Maschinen können ihre Ressourcen viel besser vereinen als Menschen. Zwar können auch Menschen im Team physische und mentale Leistung vollbringen, die sie alleine nicht schaffen würden. Doch Maschinen können jederzeit ohne große Umstände ihre Prozessor-, Speicher- und Kommunikationsressourcen zusammenlegen. Wie zuvor besprochen, entwickelt sich das Internet zu einem weltumspannenden Netz von

Berechnungsressourcen, die sich im Handumdrehen zu riesigen Supercomputern kombinieren lassen.

Maschinen haben ein extrem gutes Gedächtnis. Moderne Computer können Milliarden von Fakten speichern und die Kapazität verdoppelt sich mit jedem Jahr.¹⁵⁹ Die Geschwindigkeit und das Preis-Leistungs-Verhältnis von Berechnungen verdoppeln sich ebenfalls jährlich und die Verdopplungsrate nimmt immer weiter zu.

Das menschliche Wissen verlagert sich immer mehr in dieses Netz – dort können Maschinen es lesen, verstehen und erweitern. Die Zeiten, in der ein einzelner Gelehrter mit der gesamten menschlichen Wissenschaft vertraut sein konnte, sind seit Hunderten von Jahren vorbei.

Maschinelle Intelligenz kann zudem konstant Höchstleistung erbringen und muss sich dabei nicht auf einzelne Bereiche spezialisieren. Ein Mensch ist vielleicht ein genialer Komponist, und ein anderer ein brillanter Halbleiterphysiker, doch aufgrund der starren Architektur unseres Gehirns fehlt uns die Kapazität (oder die Zeit) um in allen Fähigkeiten ein Spitzenniveau zu erreichen. Zudem variiert Begabung von Mensch zu Mensch: Meinen wir den Durchschnittsmenschen oder Beethoven, wenn wir von menschlicher Musikalität sprechen? Nichtbiologische Intelligenz wird in allen Bereichen gleichermaßen menschliche Spitzenleistungen erreichen und übertreffen.

Aus diesen Gründen wird ein Computer, der die Feinheiten und die Vielfalt der menschlichen Intelligenz meistert, diese auch automatisch überflügeln.

Man kann sich fragen, ob die Singularität mit der Henne (starke KI) oder mit dem Ei (Nanotechnik) beginnen wird. In anderen Worten: Wird starke KI zu voll entwickelter Nanotechnik (molekulare Assembler, die Informationen in physische Produkte wandeln) führen, oder Nanotechnik zu starker KI? Für Ersteres spricht, dass starke KI aus den eben genannten Gründen übermenschliche Intelligenz impliziert. Diese könnte die verbleibenden technischen Probleme auf dem Weg zu voll entwickelter Nanotechnik lösen.

Das Argument für das zweite Szenario lautet, dass die Nanotechnik die nötige Hardware für starke KI bereitstellen wird. Nanobots würden zudem,

durch hochdetaillierte Gehirnscans für ein vollständiges Reverse Engineering des menschlichen Gehirns, die Softwareentwicklung erleichtern.

Beide Annahmen erscheinen logisch; jede der beiden Techniken unterstützt die andere. Die Realität wird so aussehen, dass Fortschritte in beiden Bereichen stets auf unserer neuesten Technik aufbauen, die beiden Felder werden sich also wechselseitig vorantreiben. Ich glaube jedoch, dass molekulare Fertigung ein paar Jahre eher möglich sein wird (und zwar um 2025, starke KI dagegen um 2029).

So revolutionär die Nanotechnik auch sein wird, die Konsequenzen von starker KI sind ungleich größer. Nanotechnik ist machtvoll, aber nicht intelligent. Wir können zumindest versuchen, das enorme Potenzial der Nanotechnik zu bändigen – Superintelligenz ist dagegen naturgemäß unkontrollierbar.

KI außer Kontrolle. Sobald einmal eine starke KI erschaffen ist, kann sie auch verbessert, und ihre Fähigkeiten vervielfacht werden – das liegt in der Natur von Maschinen. Eine starke KI wird weitere starke KIs erzeugen, welche ihren eigenen Aufbau überarbeiten und wiederum weitere verbesserte KIs in die Welt setzen – ein endloser Kreislauf. Mit jedem Schritt entsteht eine noch intelligentere KI, wobei die Dauer der Entwicklungsschritte abnimmt, wie in der technischen (und jeder anderen) Evolution üblich. Viele gehen davon aus, dass mit der Erschaffung der ersten starken KI sofort eine völlig unkontrollierbare, ausufernde Entwicklung von Superintelligenz angestoßen wird.¹⁶⁰

Meine Auffassung ist etwas anders. Besagte Entwicklung ist zwar eine logische Konsequenz, aber wir müssen auch das Timing berücksichtigen. Maschinen mit menschlichen Fähigkeiten werden nicht *sofort* eine eskalierende Kettenreaktion auslösen, denn menschliche Fähigkeiten haben ihre Grenzen – dafür gibt es sechs Milliarden Beispiele auf der Welt. Greifen wir hundert davon heraus, beispielsweise aus einem Einkaufszentrum. Wir hätten es wohl größtenteils mit gebildeten Menschen zu tun. Doch beim Versuch, die menschliche Intelligenz zu verbessern, käme diese Gruppe vermutlich nicht weit, selbst wenn sie über alle Daten

betreffend das menschliche Gehirn verfügte. Wahrscheinlich hätte sie sogar Schwierigkeiten, einen einfachen Computer zu konstruieren – und diese Schwierigkeiten würden sich nicht unmittelbar in Luft auflösen, wenn man die Rechen- und Speicherkapazität dieser Menschen erhöhen würde.

Doch wie wir festgestellt haben, werden sich Maschinen mit menschlichen Spitzenleistungen auf allen Gebieten messen können (und diese auch bald überbieten). Gehen wir also besser von hundert Wissenschaftlern und Ingenieuren aus. Eine Gruppe von Menschen mit technischem Hintergrund sollte tatsächlich in der Lage sein, die vorliegenden Konstruktionspläne (für menschliche Intelligenz) zu verbessern. Gäbe es also eine Maschine, die einhundert (oder tausend oder einer Million) technisch ausgebildeten Menschen entspricht, könnte sie den technischen Prozess sehr viel schneller vorantreiben als biologische Menschen, und es käme zu einer drastischen Beschleunigung der Intelligenzentwicklung.

Doch diese Beschleunigung setzt nicht sofort mit dem Moment ein, in dem ein Computer den Turing-Test besteht. Der Turing-Test ist ein Beleg für durchschnittliche menschliche Fähigkeiten, entspricht also eher der Gruppe aus dem Einkaufszentrum. Computer werden einige Zeit brauchen, um sich alle erforderlichen Fähigkeiten und das nötige Wissen anzueignen.

Sobald wir erfolgreich eine Maschine konstruiert haben, die den Turing-Test besteht (gegen 2029), wird eine Konsolidierungsphase einsetzen, in der nichtbiologische Intelligenz zügig Fortschritte macht. Doch zu der außerordentlichen Intelligenzvermehrung, der milliardenfachen Multiplikation menschlicher Intelligenz, welche die Singularität kennzeichnet, wird es (wie in **Kapitel 3** besprochen) erst Mitte der 2040er kommen.

Der KI-Winter

Es gibt dieses dämliche Gerücht, dass KI gescheitert ist, dabei sind wir jeden Tag, in jeder Sekunde von KI umgeben. Die Leute merken es nur nicht. KI-Systeme in Autos setzen die Parameter der Einspritzungsanlage. Wenn ein Flugzeug landet, wird das Gate von einer KI bestimmt. Jedes Mal, wenn man ein Microsoft-Programm benutzt, versucht ein KI-System herauszufinden was wir tun, ob wir beispielsweise einen Brief schreiben wollen, und es leistet dabei ziemlich gute Arbeit. Jedes Mal, wenn wir einen Film mit computergenerierten Figuren

sehen, ist dabei KI im Spiel. Jedes Mal, wenn man ein Computerspiel spielt, spielt man gegen ein KI-System.

RODNEY BROOKS, LEITER DES MIT AI LAB¹⁶¹

Man trifft immer noch Leute, die behaupten, künstliche Intelligenz hätte ihre Blütezeit seit den 1980ern hinter sich. Eine vergleichbare Argumentation wäre, dass das Internet mit der Dotcom-Blase der 2000er gestorben sei.¹⁶² Doch die Zahl der Server, die Bandbreite und Preis-Leistung der Netztechnik und das Dollarvolumen des elektronischen Handels sind sowohl über die Boomphase als auch in der Phase, die auf das Einbrechen der Aktienkurse folgte, kontinuierlich gestiegen. Dasselbe gilt für KI.

Der Hype um ein neues technisches Paradigma – Eisenbahn, KI, Internet, Telekommunikation und nun vielleicht Nanotechnik – beginnt typischerweise mit unrealistischen Erwartungshaltungen aufgrund von Unwissen über die nötigen Voraussetzungen. Das neue Paradigma verbreitet sich zwar exponentiell, doch exponentielles Wachstum ist langsam, bis die Biegung der Kurve erreicht ist. Die Erwartungen bezüglich revolutionärer Veränderungen sind zwar nicht überzogen, aber der angesetzte Zeitpunkt ist falsch – weshalb es zu einer Phase der Desillusionierung kommt, wenn sich die Erwartungen nicht sofort erfüllen. Der exponentielle Prozess jedoch läuft davon unbeirrt weiter, und Jahre später kommt es zur Ausreifung und einer realistischen Transformation.

Ein Beispiel ist der Eisenbahnboom, auf den eine Welle von Insolvenzen folgte. (In meiner Sammlung historischer Dokumente finden sich einige dieser frühen, unbezahlten Eisenbahnanleihen). Wir spüren noch heute die Auswirkungen der vor einigen Jahren geplatzten E-Kommerz- und Telekommunikationsblase, die zu einer Rezession beitrug, von welcher wir uns gerade erst erholen.

Auslöser für einen verfrühten KI-Optimismus waren Programme wie der 1957 von Allen Newell, J. C. Shaw und Herbert Simon erstellte „General Problem Solver“*, welcher in der Lage war, Beweise für Probleme zu finden, an denen sich Mathematiker wie Bertrand Russell die Zähne ausbissen. Oder frühe Entwicklungen des MIT Artificial Intelligence

Laboratory, die SAT-Probleme (etwa Analogien und Textaufgaben) auf dem Niveau von College-Schülern lösen konnten.¹⁶³ In 1970ern entstanden plötzliche zahlreiche KI-Unternehmen, doch als die erhofften Profite ausblieben, kam es zu einer Pleitewelle, dem sogenannten „KI-Winter“. Viele glauben immer noch, dass die Geschichte mit dem KI-Winter zu Ende ging und sich seither auf dem Gebiet nichts mehr getan hat.

Und doch gibt es gegenwärtig in industriellen Infrastrukturen Tausende von KI-Anwendungen. Die meisten dieser Anwendungen waren vor fünfzehn Jahren noch bloße Forschungsprojekte. Leute, die fragen: „Was ist eigentlich aus KI geworden?“, erinnern mich an den Touristen im Regenwald, der fragt: „Wo ist den nun die viel gerühmte Artenvielfalt?“ – mit Hunderten von getarnten Tier- und Pflanzenspezies direkt vor der Nase.

Wir befinden uns mitten im Zeitalter der „schwachen KI“, das heißt künstliche Intelligenz, die bestimmte Aufgaben, die ehemals menschliche Intelligenz erforderten, gleich gut oder noch besser als Menschen erledigt. Mit schwacher KI ausgestattete Systeme sind häufig deutlich schneller als Menschen und können Tausende von Variablen gleichzeitig berücksichtigen. Weiter unten beschreibe ich diverse Beispiele schwacher KI.

Die Entwicklungsphasen der KI (einige Jahrzehnte voller Enthusiasmus, ein Jahrzehnt der Desillusionierung, dann eineinhalb Jahrzehnte soliden Fortschritts und der Verbreitung) erscheinen recht lang, verglichen mit dem raschen Siegeszug des Internets und der Telekommunikation (der eher in Jahren als in Jahrzehnten zu bemessen ist). Dabei gibt es jedoch zwei Faktoren zu berücksichtigen. Erstens, die Entwicklung von Internet und Telekommunikation liegt noch nicht so lange zurück, daher sind sie stärker von der Beschleunigung des Paradigmenwechsels betroffen (siehe **Kapitel 1**). Jüngere Adaptionenzyklen (Boom, Pleite und echter Erfolg) sind sehr viel schneller als solche, die vor vierzig Jahren begonnen haben. Zweitens ist die KI-Revolution die tiefendste Verwandlung, die unsere Zivilisation zu durchlaufen hat, darum wird die Ausreifung länger dauern als bei weniger komplexen Techniken. Die KI-Revolution besteht in der Beherrschung des wichtigsten und machtvollsten Attributs unserer Spezies sowie der gesamten Evolution: Intelligenz.

Es liegt in der Natur der Technik, ein Phänomen zu ergründen und Systeme zu entwickeln, die dieses Phänomen konzentrieren und verstärken. So entdeckten Forscher eines Tages, dass Gase (Luft zum Beispiel) schneller über gekrümmte Oberflächen strömen als über flache Oberflächen – der sogenannte Bernoulli-Effekt. Darum ist auch der Luftdruck auf krummen Oberflächen geringer als auf flachen. Durch Erforschung, Konzentration und Verstärkung dieses Phänomens wurden moderne Flugzeuge möglich. Wenn wir einmal das Prinzip der Intelligenz verstanden haben, werden wir es gleichermaßen konzentrieren und verstärken können.

Wie in **Kapitel 4** beschrieben, beschleunigt sich die Erforschung, Modellierung und Simulation des menschlichen Gehirns in allen Aspekten, sprich: Preis-Leistung und Auflösung von Gehirnaufnahmen, die Menge an Daten und Erkenntnissen über Gehirnfunktionen und die Genauigkeit von Modellen und Simulationen der diversen Gehirnregionen.

Die KI-Forschung hat bereits eine Reihe von machtvollen Instrumenten hervorgebracht und über die Jahrzehnte hinweg verbessert. Das Reverse Engineering des Gehirns wird diese Palette um neue, biologisch inspirierte, selbstorganisierende Methoden ergänzen. Schließlich werden wir unsere technischen Fähigkeiten einsetzen, um das Phänomen Intelligenz zu konzentrieren und zu verstärken – weit hinaus über die extrem langsamen synaptischen Verknüpfungen, mit denen wir uns heute durch das Leben schlagen. Intelligenz wird vollständig vom Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs erfasst werden, das derzeit die Leistungsfähigkeit der Informationstechnik im Jahrestakt verdoppelt.

Ein Problem bei der KI-Entwicklung, dem ich in meiner vierzigjährigen Tätigkeit auf diesem Gebiet selbst begegnet bin: Sobald eine KI-Technik funktioniert, wird sie nicht mehr als KI betrachtet, sondern als ein eigenes Feld abgetan. (Beispiele sind Schrifterkennung, Spracherkennung, maschinelles Sehen, Robotik, Datamining*, medizinische Informatik und automatisierte Investition).

Der Informatiker Elaine Rich definiert KI als „die Lehre davon, wie man Computer Dinge tun lässt, in denen Menschen momentan besser sind“. Rodney Brooks, Leiter des MIT AI Lab, drückt es anders aus: „Jedes Mal, wenn wir einen neuen Teil davon durchschaut haben, verliert dieser seine

Magie; dann heißt es: *Ach, das ist nur Rechnerei.*“ Ich muss auch an Watson denken, der zu Sherlock Holmes sagt: „Ich dachte zunächst, Sie hätten da etwas Schlaues vollbracht, doch wie ich nun sehe, war es eigentlich ein Klacks.“¹⁶⁴ So ergeht es uns KI-Forschern. Der Zauber einer intelligenten Eigenschaft scheint sich in Nichts aufzulösen, sobald wir verstehen, wie sie funktioniert. Was bleibt ist das Mysterium der übrigen, noch nicht ergründeten Aspekte der Intelligenz.

Methoden der KI

KI ist die Lehre von Techniken, welche Probleme von exponentieller Schwierigkeit durch Ausnutzung von Informationen über die Problemklasse in Polynomialzeit lösen.

ELAINE RICH

Wie in **Kapitel 4** erwähnt, verfügen wir erst seit Kurzem über Modelle von Gehirnregionen, die ausreichend detailliert sind, um die KI-Entwicklung zu beeinflussen. Davor waren KI-Forscher und Ingenieure in Ermangelung von Gehirnschans mit ausreichender Auflösung auf sich allein gestellt. Sowie die ersten Flugzeugbauer sich nicht an Vögeln orientierten, waren die bisherigen KI-Methoden auch kein Reverse Engineering natürlicher Intelligenz.

Es folgt eine kleine Auswahl solcher Methoden. Seit den frühen Tagen wurden diese KI-Techniken immer wieder verbessert und sind nun weitaus stabiler und fehlerresistenter als die ersten Prototypen.

Expertensysteme. In den 1970ern wurde KI oft gleichgesetzt mit sogenannten Expertensystemen: logische Regelsysteme, welche die Entscheidungsfindung menschlicher Experten simulieren sollten. Ein entscheidender Teil der Entwicklung von Expertensystemen bestand in der Befragung von Experten des jeweiligen Gebiets, beispielsweise Ärzte oder Ingenieure, um die Regeln abzubilden, nach denen diese Menschen ihre Entscheidungen fällen.

Es gab einige frühe Erfolge, beispielsweise medizinische Diagnosesysteme, die im Vergleich mit menschlichen Ärzten recht gut

abschnitten – zumindest innerhalb eines beschränkten Testrahmens: Ein in den 1970ern entwickeltes System namens MYCIN produzierte Diagnosen und Behandlungsempfehlungen für ansteckende Krankheiten. Eine Evaluation im Jahre 1979 ergab, dass MYCIN gleichwertige oder bessere Beratung bot als jeder der teilnehmenden menschlichen Ärzte.¹⁶⁵

Im Rahmen solcher Projekte wurde bald klar, dass menschliche Entscheidungsfindung nicht auf festen logischen Regeln, sondern auf „weiche“ Anhaltspunkten basiert. Ein dunkler Fleck auf einer medizinischen Aufnahme kann Krebs bedeuten, doch zumeist beeinflussen weitere Faktoren – Umriss, Ort und Kontrast – die Diagnose. In menschliche Entscheidungen fließen gewöhnlich zahlreiche Informationsfetzen aus früheren Erfahrungen ein, von denen keiner für sich genommen ausschlaggebend wäre. Die eigentlichen Regeln, nach denen wir handeln, sind uns oft gar nicht bewusst.

Die Expertensysteme der späten 1980er versuchten dem Element der Ungewissheit Rechnung zu tragen; ihre Entscheidungen basierten auf vielen verschiedenen Hinweisen und Wahrscheinlichkeiten. MYCIN war eines der ersten dieser Systeme. Eine typische MYCIN-„Regel“ sah zum Beispiel so aus:

Wenn die zu behandelnde Infektion eine Entzündung der Hirnhaut ist und es sich um eine Pilzinfektion handelt und in der eingefärbten Zellkultur keine Organismen zu sehen sind und der Patient keine Immunschwäche aufweist und der Patient sich in einem Kokzidioidomykose-Risikogebiet aufgehalten hat und der Patient afrikanischer, asiatischer oder indischer Ethnizität ist und der Test auf Cryptococcus-Antigene in der Gehirn-Rückenmarksflüssigkeit nicht positiv war, DANN besteht eine 50-prozentige Chance, dass einer der infektiönsverursachenden Organismen Coccidioides ist.

Eine einzelne probabilistische Regel wie diese reicht nicht aus, um eine sinnvolle Aussage zu treffen, doch durch die Kombination tausender solcher Regeln können die einzelnen Hinweise zu einer zuverlässigen Entscheidung verdichtet werden.

Das vermutlich am längsten andauernde Expertensystem-Projekt ist CYC (für „enCYClopädisch“) von Doug Lenat und seinen Kollegen bei Cycorp. Das Projekt startete 1984 und kodierte Allgemeinwissen mit dem Ziel, Maschinen die unausgesprochenen Prämissen zugänglich zu machen, die menschlichen Ideen und Schlüssen zugrunde liegen. Das Projekt begann

ebenfalls mit starren logischen Regeln, ging dann über zu probabilistischen Regeln und verfügt nun über Systeme, um Wissen aus schriftlichen Quellen zu extrahieren (mit menschlicher Überwachung). Das ursprüngliche Ziel bestand darin, eine Million Regeln zu generieren, was nur einen kleinen Teil dessen ausmacht, was ein durchschnittlicher Mensch über die Welt weiß. Mittlerweile lautet Lenats erklärtes Ziel, bis 2007 „100 Millionen Dinge, etwa die Menge, die ein normaler Mensch über die Welt weiß“, zu erfassen.¹⁶⁶

Darryl Macer (University of Tsukuba in Japan) hat ebenfalls ambitionierte Pläne: Macer hat vor ein Expertensystem zu entwickeln, das alle menschlichen Ideen enthält¹⁶⁷. Eine mögliche Anwendung wäre, politische Entscheidungsträger über die geistigen Konzepte zu informieren, über die eine Gemeinde verfügt.

Bayes'sche Netze. Mit der sogenannten Bayes'schen Logik ist in den letzten zehn Jahren eine solide mathematische Grundlage entstanden, um Tausende oder gar Millionen von probabilistischen Regeln durch sogenannte „belief networks“ oder Bayes'sche Netze zu kombinieren. Dieses Verfahren wurde bereits durch den englischen Mathematiker Thomas Bayes beschrieben und 1763 post mortem publiziert. Es dient dazu, aus der Häufigkeit von Ereignissen in der Vergangenheit die Wahrscheinlichkeit für ähnliche Ereignisse in der Zukunft zu berechnen.¹⁶⁸ Viele auf Bayes'schen Methoden beruhende Expertensysteme sammeln fortlaufend Erfahrungsdaten, wodurch sie kontinuierlich lernen und ihre Entscheidungen verbessern.

Die besten Spamfilter beruhen auf dieser Technik. Der Filter, den ich persönlich benutze, heißt SpamBayes und lernt anhand von E-Mails, die entweder als „Spam“ oder „Okay“ markiert sind, künftige Mails richtig einzuordnen.¹⁶⁹ Zu Beginn füttert man den Filter mit einer Reihe markierter E-Mails. Dadurch wird das Bayes'sche Netz trainiert und ist daraufhin in der Lage, eingehende Mails in den richtigen Ordner zu verschieben. Dabei geht das Training immer weiter, mit jeder neuen Mail, vor allem, wenn der Benutzer die Entscheidungen bei Bedarf korrigiert. Dieser Filter hat die Spamsituation für mich erträglich gemacht, was einiges heißen will,

angesichts zwei- bis dreihundert aussortierter und über einhundert „echter“ Mails pro Tag. Nur etwa ein Prozent der als „Okay“ klassifizierten Mails sind Spam; praktisch nie werden echte Mails als Spam markiert. Das System ist fast so akkurat, als würde ich es von Hand machen – und dabei viel schneller.

Markovmodelle. Markovmodelle bieten eine weitere Möglichkeit, probabilistische Netze auf komplexe Sequenzen von Informationen anzuwenden.¹⁷⁰ Andrei Andreyevich Markov (1865–1922) entwickelte die Theorie der „Markovketten“, die 1923 von Norbert Wiener (1894–1964) weiterentwickelt wurde. Durch Markovketten lässt sich die Wahrscheinlichkeit einer Sequenz von Ereignissen berechnen. Sie wurden unter anderem im Zusammenhang mit Spracherkennung bekannt – in diesem Fall sind die aufeinanderfolgenden Ereignisse Phoneme (sprachliche Laute). Markovmodelle für Spracherkennung kodieren die Wahrscheinlichkeit, mit der bestimmte Klangmuster zu einem bestimmten Phonem gehören, die Einflüsse von Phonemen aufeinander sowie wahrscheinliche Abfolgen von Phonemen. Zusätzlich können probabilistische Netze höherer sprachlicher Ebenen zum Einsatz kommen, die beispielsweise die Wortreihenfolge berücksichtigen. Die konkreten Wahrscheinlichkeiten werden anhand echter Sprach- und Klangdaten gelernt, die Technik ist somit selbstorganisiert.

Markovmodelle waren eine der Methoden, die meine Kollegen und ich für die Entwicklung von Spracherkennung einsetzten.¹⁷¹ Anders als bei phonetischen Ansätzen, bei denen menschliche Linguisten spezifische Regeln für jedes Phonem festlegen, gaben wir dem System nicht vor, dass es im Englischen etwa vierundvierzig Phoneme gibt oder welche Abfolgen von Phonemen wie wahrscheinlich sind. Wir überließen es dem System, diese „Regeln“ von selbst zu entdecken, anhand tausender Stunden von Sprachaufnahmen. Der Vorteil dieses Ansatzes gegenüber handgemachten Regeln ist, dass das System subtile probabilistische Feinheiten identifizieren kann, die menschlichen Experten möglicherweise entgehen.

Neuronale Netze. Eine weitere selbstorganisierte Methode, die für Spracherkennung und viele andere Formen der Mustererkennung eingesetzt wurde, sind künstliche neuronale Netze. Diese Technik simuliert vereinfachte Modelle von Neuronen und neuronalen Verknüpfungen. Das Grundprinzip lässt sich folgendermaßen beschreiben. Jeder Input-Datenpunkt (in sprachlichen Daten hat jeder Punkt zwei Dimensionen: Frequenz und Zeit; in einem Bild ist jeder Pixel ein Punkt) wird zufällig an die Eingänge der ersten Neuronenschicht angelegt. Jeder dieser Verbindungen ist ein synaptisches Gewicht zugeordnet, das den Einfluss der Verknüpfung festlegt und am Anfang zufällig gesetzt wird. Jedes Neuron addiert die eingehenden Signale auf. Wenn das Ergebnis eine bestimmte Schwelle übersteigt, feuert das Neuron und schickt ein Signal über seine ausgehende Verbindung; wird die Schwelle nicht erreicht, so feuert das Neuron nicht und sein Output ist Null. Es gibt mehrere Neuronenschichten (in der Regel drei oder mehr), die unterschiedlich aufgebaut sein können. Beispielsweise kann eine spätere Schicht Signale an eine frühere Schicht zurückschicken. Der Output von einem oder mehreren ebenfalls zufällig gewählten Neuronen der letzten Schicht stellt die Antwort dar. (Algorithmische Beschreibung neuronaler Netze in Anmerkung: ¹⁷²).

Da die Verknüpfungen und die Verbindungsgewichte anfänglich zufällig sind, ist die Antwort eines untrainierten Netzes ebenfalls zufällig. Entscheidend ist daher der Lernprozess. So wie das vage verdrahtete Gehirn eines jungen Säugetiers ist auch ein künstliches neuronales Netz zunächst völlig ahnungslos. Sein Lehrer – etwa ein Mensch, ein Computerprogramm oder vielleicht auch ein anderes, bereits trainiertes neuronales Netz – belohnt das lernende Netz für korrekte Antworten und bestraft es für falsche. Anhand dieser Rückmeldung werden die Verbindungsgewichte des Netzes angepasst. Mit der richtigen Antwort konsistente Verbindungen werden gestärkt, und solche, die zu einer falschen Antwort beitragen, geschwächt. Dadurch organisiert sich das Netz mit der Zeit, bis es von allein die richtige Antwort liefert. Experimente zeigen, dass neuronale Netze selbst mit einem unzuverlässigen Lehrer ihre Aufgabe lernen können: Selbst wenn der Lehrer nur in 60 Prozent der Fälle recht hat, lernt das Netz die richtigen Antworten.

Ein leistungsstarkes, gut trainiertes neuronales Netz kann ein breites Spektrum menschlicher Mustererkennungsfähigkeiten emulieren. Systeme mit mehrschichtigen neuronalen Netzen liefern eindrucksvolle Ergebnisse bei der Erkennung von Handschriften, Gesichtern, Betrugsversuchen bei kommerziellen Transaktionen (zum Beispiel Kreditkartenzahlungen) und so weiter. Nach meiner Erfahrung besteht die Herausforderung nicht in der Programmierung des Netzes, sondern darin, geeignete Trainingsdaten bereitzustellen.

Im Zusammenhang mit den immer besser werdenden Modellen der neuronalen Gehirnfunktionen geht der Trend mittlerweile in Richtung realistischerer und komplexerer neuronaler Netze, die sich stärker an der Biologie orientieren.¹⁷³ Dank unserer über Jahrzehnte gesammelten Erfahrungen mit selbstorganisierenden Paradigmen können neue Erkenntnisse der Hirnforschung schnell in Experimenten mit künstlichen neuronalen Netzen angewandt werden.

Neuronale Netze sind von Natur aus parallelisierbar – schließlich arbeitet auch das Gehirn parallel: es hat keinen zentralen Prozessor, der die einzelnen Neuronen simuliert, vielmehr ist jedes Neuron und jede Synapse ein kleiner, langsamer Prozessor. Derzeit wird an Spezialchips mit einer parallelen neuronalen Architektur gearbeitet, welche die Durchsatzrate deutlich steigern sollen.¹⁷⁴

Genetische Algorithmen (GAs). Ein weiteres biologisch inspiriertes, selbstorganisierendes Paradigma sind Genetische Algorithmen beziehungsweise Evolutionäre Algorithmen. Sie emulieren Evolution durch sexuelle Reproduktion und Mutation. Das Folgende ist eine vereinfachte Beschreibung ihrer Funktionsweise.

Zunächst muss ein Weg gefunden werden, um mögliche Lösungen für das jeweilige Problem zu kodieren. Besteht das Problem beispielsweise darin, die Konstruktionsparameter eines Düsentriebwerks zu optimieren, so ist der Code eine Liste von Parametern (beziehungsweise eine entsprechende Bitfolge). Dies ist der genetische Code der algorithmischen Evolution. Nun generiert man Tausende solcher Codesequenzen – jede

davon enthält einen Satz von Parametern und stellt ein simuliertes „Lösungsindividuum“ dar.

Jedes Individuum wird in einer Simulationsumgebung evaluiert, das heißt, nach einer vorher festgelegten Methode wird die Güte jeder Parameterliste festgestellt. Diese Evaluationsmethode ist der Schlüssel zum Erfolg. In unserem Beispiel würden wir ein Triebwerk mit den jeweiligen Parametern simulieren, und die Zielkriterien (Spritverbrauch, Leistung oder Ähnliches) entsprechend bewerten. Die erfolgreichsten Individuen (also die besten Parameterlisten) überleben, der Rest wird eliminiert.

Nun vermehrt man die überlebenden Individuen, bis wieder die ursprüngliche Anzahl erreicht ist. Dies geschieht durch sexuelle Reproduktion, sprich die Nachkommen werden durch Vermischung des Gencodes von je zwei Individuen erzeugt. Gewöhnlich gibt es kein männlich und weiblich; die Eltern werden zufällig gewählt. Bei der Vermehrung werden zusätzlich einige Mutationen (zufällige Änderungen) vorgenommen.

Nun haben wir einen vollständigen Lebenszyklus einer Generation simulierter Lösungsindividuen beschrieben. Diese Schritte werden nun mit jeder folgenden Generation wiederholt. Nach jedem Zyklus wird überprüft, inwiefern sich die Lösungen verbessert haben. Wenn die Verbesserungen von Generation zu Generation nur noch sehr gering sind, beenden wir die Schleife und verwenden das beste Individuum der letzten Generation als Lösung. (Algorithmische Beschreibung Genetischer Algorithmen in der Anmerkung: ¹⁷⁵).

In einem GA wird die Lösung nicht direkt von Menschenhand programmiert, sondern evolviert durch einen simulierten Wettbewerb und iterative Verbesserungen. Wie zuvor besprochen ist die natürliche Evolution erfolgreich, aber langsam. Wenn wir uns ihre Methoden zunutze machen, versuchen wir daher, ihre Effektivität zu erreichen, aber ihre Schwerfälligkeit abzuschütteln. Computer sind schnell genug, um viele Generationen innerhalb von Stunden, Tagen oder Wochen zu simulieren. Außerdem muss die Iteration nur einmal durchlaufen werden: Sobald die simulierte Evolution abgeschlossen ist, können wir die dabei entwickelte hochoptimierte Lösung schnell und effizient auf reale Probleme anwenden.

Wie GAs sind neuronale Netze ein Weg, um subtile, hintergründige Muster in chaotischen Daten auszunutzen. Die entscheidende Voraussetzung ist eine brauchbare Bewertungsfunktion für die Lösungskandidaten. Diese Funktion muss effizient berechenbar sein, da in jeder Generation Tausende von Individuen evaluiert werden müssen.

GAs können solche Probleme lösen, an denen analytische Ansätze aufgrund einer zu großen Variablenanzahl scheitern. Bei der Entwicklung eines Düsentriebwerks sind beispielsweise über hundert Variablen und Dutzende von Bedingungen zu berücksichtigen. General Electric entwickelte mithilfe von GAs Triebwerke, welche die Zielbedingungen besser erfüllten als auf konventionelle Weise konstruierte Systeme.

Allerdings gibt es auch Stolpersteine: Der Forscher Jon Bird (University of Sussex) benutzte einen GA, um eine optimale Oszillatorschaltung zu entwickeln. Mehrere Durchläufe des Algorithmus ergaben konventionelle Schaltungen mit wenigen Transistoren, doch die beste Lösung war einfach ein Radioempfänger. Offenbar entdeckte der GA, dass ein Radioschaltkreis ein oszillierendes Brummen eines in der Nähe befindlichen Computers auffing.¹⁷⁶ Die Lösung funktionierte nur an der exakten Position auf dem Tisch, wo sie entwickelt wurde.

Genetische Algorithmen gehören in den Bereich der Chaos- und Komplexitätstheorie. Sie finden immer öfter Anwendung bei ansonsten schwer zu bewältigenden logistischen Problemen, beispielsweise der Optimierung komplexer Versorgungsketten. GAs beginnen analytische Verfahren in vielen Industriellen Breichen zu verdrängen. (Beispiele weiter unten). Sie sind zudem auch für Mustererkennung einsetzbar und werden häufig mit neuronalen Netzen und anderen selbstorganisierenden Techniken kombiniert. GAs bieten sich auch für die Softwareentwicklung an, besonders wenn es um Ressourcenverteilung geht.

Science-Fiction-Autor Cory Doctorow beschreibt in seinem Roman */usr/bin/god* einen GA zur Entwicklung von KI. Der GA generiert durch Kombinationen diverser raffinierter Techniken eine große Anzahl intelligenter Systeme, die jeweils durch einen genetischen Code beschrieben sind und sich durch den Algorithmus weiterentwickeln. Die Evaluation sieht dabei folgendermaßen aus: Jedes der Systeme loggt sich in

einen Chatroom ein und versucht, sich als Mensch auszugeben – sozusagen ein verkappter Turing-Test. Wenn einer der menschlichen Besucher des Chatrooms etwas sagt wie „Bist du ein Chatbot, oder was?“ (Chatbots – automatische Chatprogramme – haben zum derzeitigen Entwicklungsstand kein menschliches Sprachverständnis), so ist die Evaluation beendet, das System loggt sich aus und meldet seine Bewertung an den GA. Diese Bewertung hängt davon ab, wie lange es dem System gelang, sich als Mensch auszugeben, ohne aufzufliegen. Der GA entwickelt dadurch immer bessere kombinierte Systeme, die immer besser als Mensch durchgehen.

Das Hauptproblem mit diesem Szenario ist, dass die Bewertungsfunktion ziemlich langsam ist – wobei die Evaluation wohl noch recht schnell ginge, bevor die Systeme eine gewisse Intelligenz erreicht hätten. Die Evaluation könnte zudem weitgehend parallel stattfinden. Die Idee ist nicht uninteressant und könnte tatsächlich einmal KIs den letzten Schliff verleihen, den sie brauchen, um den Turing-Test zu bestehen – sobald wir über ausreichend entwickelte KI-Systeme verfügen, die einem solchen GA als Lösungskandidaten dienen und zumindest potenziell den Turing-Test bestehen können.

Rekursive Suche. Oft müssen wir eine große Anzahl möglicher Kombinationen durchprobieren, um die Lösung für ein bestimmtes Problem zu finden. Klassische Beispiele sind Spiele wie Schach. Auf der Suche nach dem besten Zug kann ein Spieler alle möglichen Züge durchgehen, und für jeden dieser Züge alle möglichen Gegenzüge des Gegners – und so weiter. Für Menschen ist es jedoch schwierig, einen größeren „Suchbaum“ mit vielen Zügen und Gegenzügen im Kopf zu behalten – darum greifen Menschen auf Mustererkennung zurück: Sie schätzen Stellungen anhand früherer Erfahrungen ein, während Computer eine systematische Analyse von Millionen von Zügen und Gegenzügen durchführen.

Solche Suchbäume sind das Herzstück der meisten Brettspielprogramme – werfen wir ein Blick darauf, wie sie funktionieren. Wir entwickeln dazu ein hypothetisches Programm namens `PickBest-NextStep*`, das den besten Zug für eine gegebene Stellung finden soll. `PickBestNextStep` erstellt zunächst eine Liste aller möglichen Züge. (Wenn das Problem darin

bestünde, ein mathematisches Theorem zu beweisen, würde das Programm eine Liste möglicher nächster Beweisschritte erstellen). Für jeden dieser Züge erstellt das Programm ein neues hypothetisches Spielbrett mit der resultierenden Stellung. Für jede hypothetische Stellung müssen nun die möglichen Reaktionen des Gegners untersucht werden. Hier kommt die Rekursion ins Spiel: `PickBestNextStep` ruft einfach das Programm `PickBestNextStep` (also sich selbst) auf, um den stärksten Zug des Gegners zu berechnen. Der rekursive Aufruf von `PickBestNextStep` geht nun alle möglichen Züge des Gegners durch.

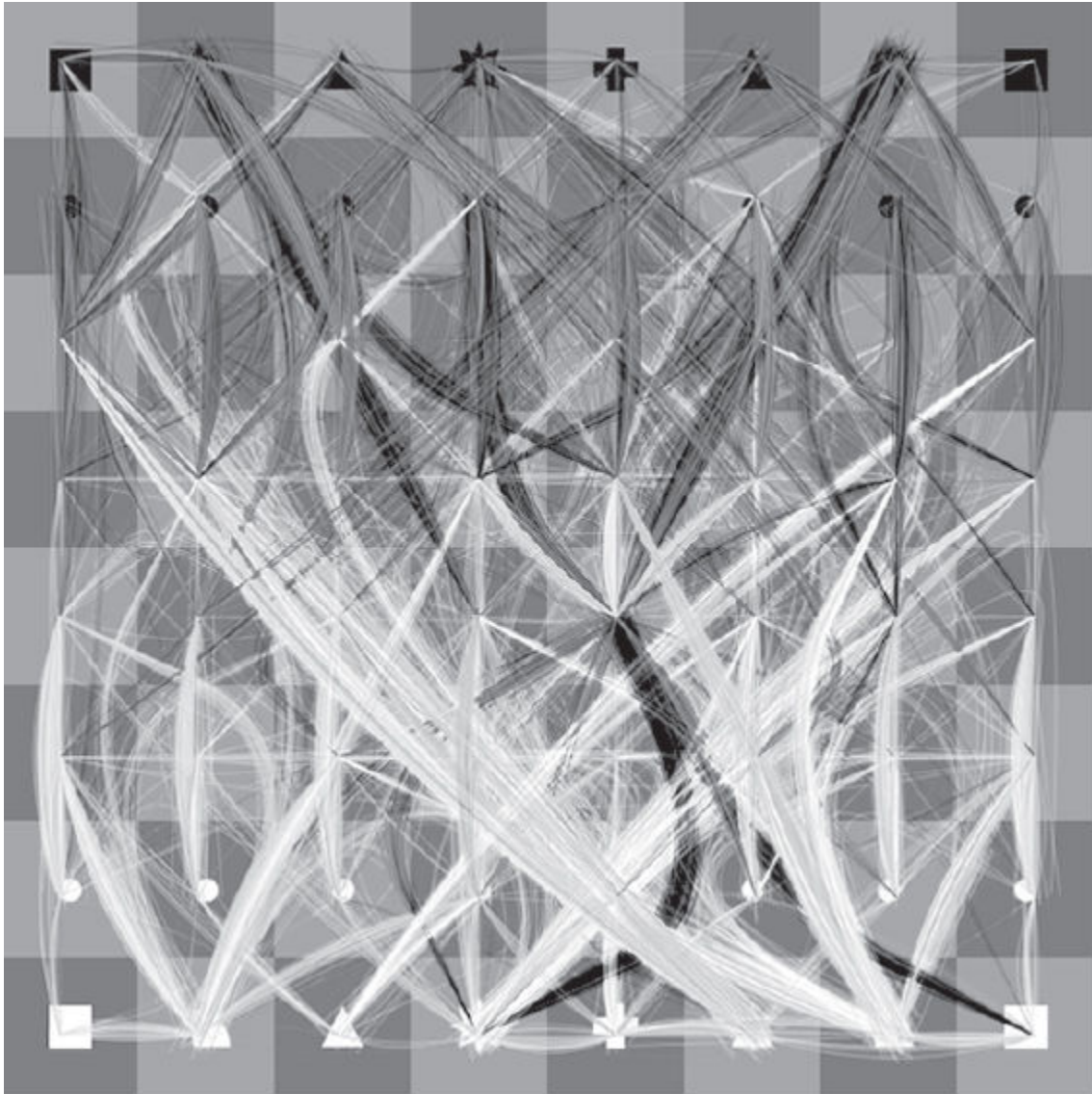
Das Programm ruft sich immer wieder selbst auf, geht so viele Züge durch, wie im Rahmen der verfügbaren Zeit möglich, und erzeugt einen großen, verzweigten Suchbaum aus möglichen Zügen und Erwiderungen. Hier haben wir ein weiteres Beispiel für exponentielles Wachstum, denn mit jedem weiteren Zug, den wir vorausblicken, wird der Rechenaufwand ungefähr verfünffacht. Der Schlüssel zum Erfolg besteht darin, den Suchbaum an einem gewissen Punkt zu stützen und das Wachstum einzudämmen. Im Brettspielszenario bedeutet das, dass das Wachstum eines Suchbaumzweiges bei Erreichen einer für einen der Spieler hoffnungslosen Stellung abgebrochen wird (der Suchbaum mündet hier in ein „Blatt“) und der hypothetische Zug als Sieg oder Niederlage betrachtet wird. Wenn alle verschachtelten Programmaufrufe abgeschlossen sind, hat das Programm den besten möglichen Zug für die Ausgangsstellung ermittelt – im Rahmen der zeitlich möglichen Rekursionstiefe und der Güte der Bewertungsfunktion für hoffnungslose Stellungen. (Algorithmische Beschreibung von rekursiver Suche in der Anmerkung: ¹⁷⁷).

Rekursive Suche ist oft in der Mathematik von Nutzen. Die „Spielzüge“ sind hier die Axiome und die bewiesenen Theoreme des jeweiligen Feldes. Die Liste möglicher nächster Schritte besteht in den Axiomen und Theoremen, die am jeweiligen Punkt eines Beweises angewandt werden können. (Diese Methode setzten Newell, Shaw und Simon in ihrem General Problem Solver ein).

Diese Beispiele erwecken möglicherweise den Eindruck, Rekursion sei nur für Probleme mit streng definierten Regeln und Zielen geeignet. Doch Rekursion lässt sich potenziell auch für computergenerierte Kunst

einsetzen. Ein von mir entwickeltes Programm namens „Ray Kurzweil’s Cybernetic Poet“ basiert beispielsweise auf einem rekursiven Ansatz.¹⁷⁸ Das Programm setzt für jedes Wort in einem zu schreibenden Gedicht eine Reihe von Zielkriterien: Rhythmisches Muster, Textstruktur und Wortwahl sollen der Wortposition angemessen sein. Wenn das Programm nicht in der Lage ist, ein Wort zu finden, das diesen Kriterien entspricht, geht es einen Schritt zurück, löscht das vorherige Wort und sucht ein anderes an dieser Stelle passendes Wort. Wenn sich auch hier eine Sackgasse ergibt, geht es noch einen Schritt zurück und bewegt sich in dieser Weise vorwärts und rückwärts. Wenn alle Wege im Sand verlaufen, lockert das Programm einige der Kriterien.

Schwarz (Computer)... entscheidet über einen Zug



Weiß (Sie)

„Thinking Machines 2“ von Martin Wattenberg und Marek Walczak zeigt Zug-Gegenzug-Sequenzen, die ein Computer auswertet, um den nächsten Zug zu bestimmen.

Remis gegen Deep Fritz – werden Menschen schlauer oder Computer dümmer?

Im Computerschach findet sich ein gutes Beispiel für qualitative Verbesserungen von Software. Eines verbreiteten Irrglaubens zufolge steigern sich Schachprogramme allein durch die Zunahme der rohen Rechenpower von Computerhardware. Doch im Oktober 2002 hielt das Programm Deep Fritz Remis gegen den damals stärksten menschlichen Spieler Vladimir Kramnik – Deep Fritz verfügte über nur 1,3 Prozent der Rechenleistung des vorigen Computerchampions Deep Blue! Dass Deep Fritz dennoch auf vergleichbarem Niveau spielt, ist seinem überlegenen, auf Mustererkennung basierenden Pruning-Algorithmus* zu verdanken. In sechs Jahren werden auch Programme wie Deep Fritz über die Rechenleistung verfügen, um wie Deep Blue zweihundert Millionen Stellungen pro Sekunde zu analysieren. Noch in diesem Jahrzehnt wird es Schachprogramme in der Art von Deep Fritz für gewöhnliche PCs geben, die jeden menschlichen Gegner besiegen.

In meinem zwischen 1986 und 1989 entstandenen Buch *The Age of Intelligent Machines* sagte ich voraus, dass gegen Ende der 1990er ein Computer den menschlichen Schachweltmeister besiegen würde. Ich merkte außerdem an, dass sich die Schachwertung von Computern um 4,5 Punkte im Jahr verbesserte, während die Punktezahl des menschlichen Ranglistenführers mehr oder weniger gleich blieb – weshalb er demzufolge 1998 eingeholt werden würde. Und tatsächlich unterlag Gary Kasparov 1997 in einem medienträchtigen Turnier gegen Deep Blue.

Doch in der Partie Deep Fritz gegen Kramnik erreichte das derzeit beste Computerprogramm lediglich ein Unentschieden. Fünf Jahre waren vergangen seit dem Sieg von Deep Blue, was hat das zu bedeuten? Sollten wir daraus schließen, dass:

1. Menschen schlauer werden, oder zumindest besser im Schachspielen?
2. Computer schlechter werden? Wenn dem so ist, war die viel gerühmte Steigerung der Rechenleistung in den letzten fünf Jahren vielleicht doch nicht das Gelbe vom Ei? Oder wird die Schachsoftware schlechter?

Vorteile durch Spezial-Hardware

Keine dieser Mutmaßungen ist zutreffend. Die Wahrheit ist, dass die Software besser geworden ist, weil Deep Fritz mit sehr viel geringeren Hardwareressourcen dieselbe Leistung erreichte wie Deep Blue. Um zu verstehen, wie das möglich ist, brauchen wir ein paar Hintergrundinformationen.

Als ich in den 1980ern meine Vorhersagen für die Entwicklung des Computerschachs zu Papier brachte, begann man an der Carnegie Mellon University (CMU) gerade, spezialisierte Chips zu entwickeln, die den „Minimax-Algorithmus“ für Schachpositionen ausführen. (Minimax ist das Standardverfahren für Zwei-Personen-Spiele und basiert auf Zug-Suchbäumen und der Auswertung von Positionen in den Blättern des Baumes). Mithilfe dieser Spezialhardware konstruierte die CMU den Schachcomputer HiTech, der 175.000 Stellungen pro Sekunde analysieren konnte und eine Schachwertung von 2.359 erreichte – nur 440 Punkte unter dem Weltmeister.

Ein Jahr später baute die CMU eine weitere Maschine, Deep Thought, die eine Kapazität von einer Million Stellungen pro Sekunde und 2.400 Punkte erreichte. IBM übernahm das Projekt und taufte es in „Deep Blue“ um, doch die Architektur blieb weitgehend dieselbe. Das Gerät, das 1997 Kasparov besiegte, analysierte mit 256 parallel arbeitenden Spezialprozessoren zweihundert Millionen Stellungen pro Sekunde.

Die spezialisierte Hardware für den Schach-Minimax-Algorithmus spielte hier eine wichtige Rolle. Systementwickler wissen, dass Spezialhardware bestimmte Algorithmen mindestens hundertmal schneller ausführen können als ein Allzweckcomputer.

Entwicklungsaufwand und -kosten für spezialisierte ASICs* sind beträchtlich, doch bei sehr oft wiederholten, kritischen Anwendungen (beispielsweise MP3-Dekodierung oder das Rendern von Spielgrafik) lohnt sich die Investition.

Deep Blue versus Deep Fritz

Die Überlegenheit von Schachcomputern über die besten Menschen galt immer als wichtiger Meilenstein, darum wurden die Mittel für die Entwicklung spezieller Schachchips bereitgestellt. Obwohl die Umstände der Partie Deep Blue gegen Kasparov umstritten waren, schwand nach 1997 das allgemeine Interesse am Computerschach – das Ziel war erreicht, wozu länger darauf herumreiten? IBM stellte das Projekt ein, und seither wurde keine spezielle Schachhardware mehr entwickelt. Die Bemühungen in verschiedenen KI-Teilbereichen haben sich seither auf Probleme größerer Tragweite verlagert, wie der Steuerung von Flugzeugen, Lenkwaffen und Fabrikrobotern, Spracherkennung, Analyse von Elektrokardiogrammen und Blutbildern, Erkennung von Kreditkartenbetrug und unzählige andere Einsatzgebiete schwacher KI.

Nichtsdestotrotz hat Computerhardware ihr exponentielles Wachstum fortgesetzt, das heißt, seit 1997 hat sich die Rechenleistung von PCs jährlich verdoppelt. Die Pentium-Allzweckprozessoren, auf denen Deep Fritz lief, waren somit etwa zweiunddreißig Mal so schnell wie Prozessoren von 1997. Deep Fritz benutzte ein Netz aus nur acht Computern, die Hardware entsprach also 256 gewöhnlichen Heimcomputern aus dem Jahr 1997. Deep Blue verfügte dagegen über 256 spezialisierte Schachprozessoren, von denen jeder etwa hundertmal schneller war als ein PC von 1997 (natürlich nur bei der Berechnung des Minimax-Algorithmus). Deep Blue hatte also, was Schach betrifft, 25.600 Mal mehr Rechenleistung als ein damaliger PC und immer noch hundertmal mehr als Deep Fritz. Dieses Verhältnis spiegelt sich auch im direkten Leistungsvergleich: Deep Blue konnte 200 Millionen Stellungen pro Sekunde analysieren, Deep Fritz dagegen nur 2,5 Millionen.

Entscheidende Unterschiede bei der Software

Was lässt sich also über die Software von Deep Fritz sagen? Schachcomputer gelten zwar oft als Beispiele von Brute-Force-Berechnung*, doch an einem gewissen Punkt müssen sie doch ein qualitatives Urteil treffen, denn die kombinatorische Explosion ist im Schach recht erheblich. In *The Age of Intelligent Machines* habe ich geschätzt, dass ein Computer mit unbeschränktem Suchbaum etwa vierzig Milliarden Jahre bräuchte, um den „perfekten“ Zug in einer gewöhnlichen Partie zu finden. (Bei angenommenen dreißig Zügen pro Spiel und acht Möglichkeiten pro Zug gibt es 8^{30} mögliche Zugfolgen; bei einer Analysekapazität von einer Milliarde Zugfolgen pro Sekunde ergibt das 10^{18} Sekunden beziehungsweise vierzig Milliarden Jahre). Ein praktikables Programm muss also fortlaufend aussichtslose Linien erkennen und verwerfen. Hier ist also ein Urteil durch Musterkennung gefragt.

Menschen, selbst Weltklassem Spieler, führen den Minimax-Algorithmus nur sehr langsam aus und durchdenken in der Regel weniger als einen Zug pro Sekunde. Wieso können es die Meister also überhaupt annähernd mit einem Computer aufnehmen? Die Antwort liegt in unseren hervorragenden Mustererkennungsfähigkeiten, durch die wir den Suchbaum extrem effizient begrenzen können.

Das Aus für menschliche Schachspieler?

Eine andere Prognose in *The Age of Intelligent Machines* lautete, dass wir uns, sobald Computer besser Schach spielen als Menschen, entweder weniger für menschliche Intelligenz, stärker für Computerintelligenz oder weniger für Schach interessieren würden – und dass, nach bisheriger Erfahrung, vermutlich Letzteres der Fall sein würde. Genau so ist es eingetreten. Kurz nach Deep Blues Sieg bekam man zu hören, Schach sei nur simple kombinatorische Berechnung, und dass der Sieg des Computers nur beweist, dass dieser besser rechnen kann als ein Mensch.

Die Realität sieht etwas anders aus. Unsere Fähigkeiten im Schach verdanken wir eindeutig nicht unseren – äußerst dürftigen – kombinatorischen Fähigkeiten. Vielmehr benutzen wir dafür unser nur

allzu menschliches Urteilsvermögen. Gerade was diese Urteilskraft betrifft, legte Deep Fritz massive Fortschritte gegenüber anderen Systemen an den Tag. (Während die Menschen über die letzten fünf Jahre keinerlei Fortschritte machten. Die menschlichen Spitzenwertungen bewegen sich weiterhin knapp unter 2.800. Im Jahr 2004 liegt Kasparov bei 2.795 und Kramnik bei 2.794).

Wie geht es weiter? Nun, da die besten Schachprogramme auf gewöhnlicher PC-Hardware laufen, werden sie auch von der fortlaufenden Vergrößerung der Rechenleistung profitieren. 2009 wird ein Programm wie Deep Fritz über Deep Blues Analysekapazität von zweihundert Millionen Stellungen pro Sekunde verfügen. Durch den Zugriff auf andere Rechenressourcen über das Internet kann dieses Potenzial sogar schon früher erreicht werden. (Das erfordert einen besseren Ausbau von Breitbandanbindungen, doch auch der wird kommen).

Durch diese Steigerung von Hardwareleistung und die Verbesserung bei der Mustererkennung werden Schachprogramme immer höhere Wertungen erreichen. Noch in diesem Jahrzehnt wird es PC-Software in der Art von Deep Fritz geben, die jeden Menschen besiegen kann. Dann werden wir wirklich das Interesse an Schach verlieren.

Kombinierte Methoden. Der beste Ansatz, um robuste KI-Systeme zu erstellen, ist die Kombination verschiedener Methoden – so funktioniert auch das menschliche Gehirn. Wie zuvor besprochen, ist das Gehirn nicht ein großes neuronales Netz, sondern besteht aus Hunderten Regionen, die jeweils auf eine bestimmte Art von Informationsverarbeitung optimiert sind. Während wir keiner dieser Hirnregionen für sich genommen menschliche Fähigkeiten zuschreiben würden, verfügt das Gesamtsystem per definitionem über eben solche.

Ich selbst habe diesen Ansatz für KI-Entwicklung benutzt, insbesondere für Mustererkennung. Für Spracherkennung beispielsweise erstellten wir eine Reihe von Mustererkennungssystemen mit verschiedenen Methoden. Manche wurden mithilfe von phonetischem und linguistischem Expertenwissen programmiert. Manche basierten auf Regeln für die

Zerlegung von Sätzen (mithilfe von Satzdiagrammen, ähnlich denen, die man aus der Schule kennt). Manche setzten auf selbstorganisierende Techniken, beispielsweise Markovmodelle, die mit einem umfangreichen Korpus aufgezeichneter und annotierter menschlicher Sprache trainiert wurden. Schließlich programmierten wir einen „Expertenmanager“, der die Stärken und Schwächen der verschiedenen „Experten“ (Mustererkennungssysteme) ermittelte und sie auf optimale Weise miteinander kombinierte. Auf diese Weise kann eine Technik, die für sich allein genommen unzuverlässig ist, dennoch zum Erfolg des Gesamtsystems beitragen.

Es gibt viele raffinierte Kombinationsmöglichkeiten der vielfältigen KI-Werkzeuge. Beispielsweise kann man Genetische Algorithmen einsetzen, um die optimale Topologie (Anordnung von Knoten und Verbindungen) von neuronalen Netzen oder Markovmodellen zu ermitteln. Ein so entwickeltes neuronales Netz kann wiederum die Parameter einer rekursiven Suche bestimmen. Wir können Signal- und Bildverarbeitungstechniken heranziehen, die für musterverarbeitende Systeme entwickelt wurden. Jede Anwendung verlangt nach einer bestimmten Architektur. Der KI-Unternehmer Ben Goertzel beschreibt in einer Reihe von Büchern und Artikeln Strategien und Architekturen für die Kombination verschiedener KI-Methoden. Seine Novamente-Architektur ist als Grundgerüst für eine Allzweck-KI gedacht.¹⁷⁹

Dies soll nur grob skizzieren, wie die immer fortschrittlicheren KI-Systeme zustande kommen. Eine umfassende Beschreibung von KI-Techniken würde den Rahmen dieses Buches sprengen – selbst wenn man eine Informatik-Doktorarbeit daraus machen würde, wäre es unmöglich, sämtliche heute gebräuchlichen Ansätze abzudecken.

Viele der im nächsten Abschnitt angeführten Beispiele kombinieren mehrere für den jeweiligen Zweck optimierte Methoden. Schwache KI wird allmählich stärker – infolge von drei parallelen Entwicklungen: exponentielle Zunahme von Rechenkapazitäten, umfangreiche Praxiserfahrung mit Tausenden von Anwendungen und neue Erkenntnisse darüber, wie das Gehirn intelligente Entscheidungen trifft.

Ausgewählte Beispiele für schwache KI

Als ich Ende der 1980er mein erstes Buch über KI schrieb, *The Age of Intelligent Machines*, musste ich umfangreiche Recherchen anstellen, um ein paar Praxisbeispiele für erfolgreich eingesetzte KI zu finden. Das Internet in seiner heutigen Form gab es noch nicht, und so musste ich in echte Bibliotheken gehen und Forschungszentren in den USA, in Europa und in Asien aufsuchen. Ich nahm praktisch jedes brauchbare Beispiel, das ich finden konnte, in mein Buch auf. Die Recherchen für mein aktuelles Buch gestalteten sich ein wenig anders: Ich konnte mich kaum retten vor überzeugenden Beispielen. Auf der Webseite KurzweilAI.net berichten wir fast täglich über ein oder mehrere neue, sensationelle KI-Systeme.¹⁸⁰

Eine Studie der Business Communications Company aus dem Jahr 2003 errechnete für das Jahr 2007 einen Markt von \$21 Milliarden für KI-Anwendungen, bei einem durchschnittlichen Jahreswachstum von 12,2 Prozent zwischen 2002 und 2007.¹⁸¹ Hauptanwendungsbereich von KI sind unter anderem Business Intelligence, Kundendienst, Finanzen, Verteidigung und nationale Sicherheit, und Bildung. Es folgt eine kleine Auswahl praktischer Beispiele.

Militär und Nachrichtendienste. Das US-Militär ist ein eifriger Konsument von KI-Systemen. Mustererkennungssoftware steuert autonome Waffensysteme, beispielsweise Marschflugkörper, die über Tausende von Kilometern hinweg ein bestimmtes Gebäude oder gar ein bestimmtes Fenster treffen können.¹⁸² Die Eckdaten der Flugbahn werden zwar im Voraus programmiert, doch ist ein gewisses Maß an flexibler Echtzeit-Bilderkennung nötig, um auf Veränderungen des Wetters und der Bodenoberfläche zu reagieren.

Die US-Streitkräfte verfügen über Prototypen selbstorganisierender Kommunikationsnetze (sogenannte „vermaschte Netze“), welche die automatische gleichzeitige Konfiguration vieler Tausender Kommunikationsknoten erlaubt, wenn ein Soldatentrupp an einem neuen Standpunkt abgesetzt wird.¹⁸³

Auf Bayes'schen Netzen und GAs basierende Expertensysteme optimieren komplexe Versorgungsketten für Millionen von Versorgungsgütern und Waffen dem schnell wechselnden Bedarf in Kampfgebieten entsprechend.

KI-Systeme werden regelmäßig für Testsimulationen von Waffensystemen wie Atombomben und Lenkwaffen herangezogen.

Die KI des Echelon-Abhörsystems erkannte angeblich frühe Hinweise auf die bevorstehenden Terroranschläge des 11. Septembers 2001.¹⁸⁴ Leider wurden diese Hinweise von menschlicher Seite nicht rechtzeitig wahrgenommen.

Der Afghanistan-Feldzug von 2002 war das Debüt des bewaffneten Predators, einer ferngesteuerten fliegenden Kampfmaschine. Der Predator ist eine langjährige Entwicklung der Airforce, die Bewaffnung mit Lenkwaffen wurde dagegen in letzter Minute improvisiert – und bewährte sich hervorragend. Im 2003 begonnenen Irak-Krieg zerstörten (vom CIA gesteuerte) Predator-Drohnen und andere unbemannte Fluggeräte Tausende von feindlichen Panzern und Raketenstützpunkten.

Alle US-Streitkräfte setzen Roboter ein. Die Army (US-Heer) nutzt sie zur Erkundung von Höhlen (in Afghanistan) und Gebäuden. Die Navy (US-Marine) setzt zur Verteidigung ihrer Flugzeugträger kleine Roboterschiffe ein. Wie ich im nächsten Kapitel besprechen werde, gibt es einen starken Trend, die Soldaten von den eigentlichen Kampfhandlungen fernzuhalten.

Weltraumerkundung. Die NASA stattet ihre unbemannten Raumsonden mit autonomer KI aus. Der Mars ist drei Lichtminuten von der Erde entfernt, Jupiter etwa vierzig Lichtminuten (je nach Position), folglich ist die Kommunikation zwischen Raumschiff und Erde stark verzögert. Darum ist es wichtig, dass die Steuersoftware solcher Einsatzgeräte in der Lage ist, selbstständig taktische Entscheidungen zu treffen. Zu diesem Zweck verfügt die Software über ein Modell ihrer eigenen Fähigkeiten, der Möglichkeiten des Raumschiffs und der Schwierigkeiten, die im Verlauf der Mission zu erwarten sind. Solche KI-Systeme sind in der Lage, auf neue Situationen intelligent zu reagieren, anstatt nur vorprogrammierten Regeln zu folgen. So konnte 1999 die Raumsonde *Deep Space One* anhand ihres technischen

Wissens eine Reihe origineller Pläne entwickeln, um eine defekte Schaltung zu umgehen, welche drohte, die Mission scheitern zu lassen.¹⁸⁵ Der erste Plan der KI schlug fehl, doch der zweite Plan brachte die Rettung. „Diese Systeme verfügen über ein Vernunft-Modell ihres inneren Aufbaus“, erklärt Brian Williams (mittlerweile am MIT), Miterfinder der autonomen Software von *Deep Space One*. „[Die Raumsonde] kann anhand dieses Modells erschließen, was nicht stimmt, und was deswegen zu tun ist.“

Mithilfe von GAs und einem Netz von Computern konzipierte die NASA eine Antenne, mit der drei Satelliten des Projektes Space Technology 5 das Magnetfeld der Erde untersuchen werden. Millionen möglicher Konstruktionskonzepte wurden in simulierter Evolution gegeneinander ausgewertet. Projektleiter Jason Lohn: „Nun benutzen wir die [GA-]Software, um mikroskopisch kleine Maschinen für die Raumfahrtnavigation, unter anderem Gyroskope, zu entwickeln. Die Software könnte Konstruktionen erfinden, auf die kein menschlicher Entwickler je kommen würde.“¹⁸⁶

Ein anderes KI-System der NASA hat selbstständig gelernt, Sterne in sehr undeutlichen Galaxieaufnahmen zu identifizieren – akkurater als menschliche Astronomen.

Neuere auf der Erde stationierte Teleskope richten sich automatisch aus und maximieren eigenständig die Wahrscheinlichkeit, ein bestimmtes, gesuchtes Phänomen zu beobachten. Diese sogenannten „autonomen, halbintelligenten Observatorien“ können auf die Wetterlage reagieren, interessante Beobachtungen erkennen und selbstständig entscheiden, ob sie solche weiterverfolgen oder nicht. Sie bemerken winzigste Kleinigkeiten, beispielsweise das Flackern eines Sterns für eine Nanosekunde, das auf einen kleinen Asteroiden hindeuten könnte, der am Rande unseres Sonnensystems das Licht des Sterns kreuzt.¹⁸⁷ Eines dieser Systeme namens MOTESS* hat in den ersten zwei Jahren seines Einsatzes bereits 180 neue Asteroiden und mehrere Kometen entdeckt. „Wir haben ein intelligentes Beobachtungssystem“, erklärt Alasdair Allan (University of Exeter). „Es denkt und reagiert selbstständig und entscheidet, ob eine Entdeckung interessant genug für eine genauere Beobachtung ist. Falls eine nähere Untersuchung nötig ist, nimmt es diese einfach vor.“

Ähnliche Systeme analysieren für das Militär Daten von Spionagesatelliten. Moderne Satelliten können die Erdoberfläche auf wenige Zentimeter genau abbilden und werden durch schlechtes Wetter, Wolken und Dunkelheit nicht beeinträchtigt.¹⁸⁸ Ohne eine automatische Erkennung von relevanten Veränderungen wäre die erzeugte Datenmenge nicht handhabbar.

Medizin. Wenn sie ein Elektrokardiogramm (EKG) machen lassen, bekommt ihr Arzt vermutlich eine automatische Diagnose der Aufnahmen durch ein Mustererkennungssystem vorgelegt. Mein eigenes Unternehmen (Kurzweil Technologies) arbeitet zusammen mit United Therapeutics an einem System zur automatischen dauerhaften EKG-Überwachung im Alltag (durch in Kleidung eingearbeitete Sensoren und drahtlose Kommunikation durch ein Mobiltelefon), das frühe Warnsignale für Herzerkrankungen erkennt.¹⁸⁹ Mustererkennung wird auch zur Analyse vieler medizinischer Aufnahmen eingesetzt.

Jeder größere Hersteller medizinischer Wirkstoffe setzt in der Entwicklung Mustererkennung und intelligente Analyseverfahren ein. SRI International erstellt flexible Wissensdatenbanken, die unser gesamtes Wissen über Dutzende Krankheitserreger (unter anderem für Tuberkulose und Magengeschwüre) enthält.¹⁹⁰ Das Ziel ist dabei, mithilfe intelligenter Dataming-Werkzeuge (Software, die nach unbekannten Zusammenhängen in Daten sucht) neue Wege zu finden, diese Erreger abzutöten oder ihren Stoffwechsel lahmzulegen.

Ähnliche automatische Systeme sind im Einsatz, um auch für andere Krankheiten neue Behandlungsmöglichkeiten zu entdecken, und die Funktion von Genen und ihre Rolle bei Erkrankungen zu ermitteln.¹⁹¹ Abbott Laboratories behauptet, in einem ihrer neuen mit KI-gesteuerten Roboter- und Analysesystemen ausgerüsteten Labors könnten sechs Wissenschaftler die Arbeit leisten, die zweihundert Wissenschaftler mit altmodischem Equipment leisteten.¹⁹²

Bei Männern mit einer erhöhten Menge prostataspezifischer Antigene (PSA) wird in der Regel eine chirurgische Biopsie vorgenommen, wobei 75 Prozent keinen Prostatakrebs haben. Ein neuer Test wendet

Mustererkennung auf Proteine im Blut an und kann diese Falschakzeptanzrate auf etwa 29 Prozent senken.¹⁹³ Der Test basiert auf einem von Correlogic Systems (Bethesda, Maryland) entwickelten KI-Programm, und die Genauigkeit lässt sich vermutlich noch verbessern.

Erkennung von Proteinmustern kann auch zur Erkennung von Eierstockkrebs eingesetzt werden. Mit dem bislang besten Test („CA-125“) werden selbst in Kombination mit Ultraschall fast alle Tumore in frühen Stadien übersehen. „Zum Zeitpunkt der Diagnose ist Eierstockkrebs in vielen Fällen bereits tödlich“, sagt Emanuel Petricoin III., Kodirektor des am National Cancer Institute durchgeführten Clinical Proteomics Program der FDA. Petricoin ist führender Entwickler eines neuen KI-basierten Tests, der außergewöhnliche Proteinmuster erkennt, die nur bei Krebspatienten vorliegen. In einer Evaluation mit Hunderten von Blutproben erkannte der Test Krebs „mit einer Genauigkeit von erstaunlichen 100%, selbst in den frühesten Stadien“, so Petricoin.¹⁹⁴

In den USA werden etwa 10 Prozent der Pap-Abstriche durch ein selbstlernendes KI-Programm namens FocalPoint analysiert (entwickelt von TriPath Imaging). Die Entwickler befragten zunächst erfahrene Pathologen nach ihren Kriterien. Das KI-System lernte dann selbstständig weiter aus der Arbeit menschlicher Experten – dabei schaute es nur den besten menschlichen Diagnostikern über die Schulter. „Das ist der Vorteil von Expertensystemen“, erklärt Bob Schmidt, technischer Produktmanager bei TriPath, „sie erlauben uns, unsere besten Leute zu replizieren.“

Ohio State University Health System hat ein CPOE*-System entwickelt – basierend auf einem Expertensystem mit umfangreichem Wissen in vielen Spezialgebieten.¹⁹⁵ Das System überprüft jede ärztliche Anweisung auf mögliche allergische Reaktionen, medikamentöse Wechselwirkungen, redundante Verschreibungen, Dosierung und Angemessenheit angesichts der radiologischen Befunde und der Laborwerte des Patienten.

Wissenschaft und Mathematik. An der University of Wales entwickelte man einen „Forschroboter“, bestehend aus einem KI-System, das neue wissenschaftliche Theorien formulieren kann, einem Robotersystem, welches automatisch entsprechende Experimente durchführen kann, und

einem Logiksystem, das Schlüsse aus den Ergebnissen zieht. Die Entwickler setzten ihr Gerät auf das Modell der Genexpression in Hefe an. Das System „stellt automatisch Hypothesen auf, um Beobachtungen zu erklären, entwickelt Experimente, um diese Hypothesen zu testen, führt die Experimente mit einem Laborroboter physikalisch durch, interpretiert die Ergebnisse, um inkonsistente Hypothesen zu falsifizieren, und wiederholt dann den ganzen Zyklus.“¹⁹⁶ Das System verbessert seine Arbeitsweise, indem es aus seinen Erfahrungen lernt. Die Experimente, die der Forschroboter konzipierte, waren dreimal kostengünstiger als von Menschen erdachte Experimente. Ein direkter Vergleich der Maschine mit einer Gruppe menschlicher Forscher ergab, dass die Entdeckungen der Maschine mit denen der Menschen vergleichbar waren.

Der leitende Biologe Mike Young (University of Wales) – einer der Wissenschaftler, die gegen die Maschine unterlagen – erklärte: „Der Roboter hat gewonnen, aber nur, weil ich einmal versehentlich den falschen Knopf gedrückt habe.“

Eine seit Langem bestehende algebraische Vermutung konnte letzten Endes durch ein KI-System des Argonne National Laboratory bewiesen werden. Menschliche Mathematiker nannten den Beweis „kreativ“.

Handel, Finanzen und Fertigung. Unternehmen aller Industriezweige nutzen KI um Logistik zu überwachen und zu optimieren, Betrug und Geldwäsche aufzudecken und intelligente Analysen der täglich anfallenden Datenberge zu erstellen. Wal-Mart beispielsweise sammelt jeden Tag große Mengen an Informationen über Kundentransaktionen. KI-Programme mit neuronalen Netzen und Expertensystemen werten diese Daten aus und erstellen Marktforschungsberichte für die Manager. Dieses intelligente Datamining ermöglicht ihnen, den täglichen Warenbedarf der Filialen präzise abzuschätzen.¹⁹⁷

KI-basierte Programme werden standardmäßig eingesetzt, um betrügerische Finanztransaktionen zu erkennen. Die vom englische Unternehmen Future Route angebotene Software iHex beispielsweise setzt an der Oxford University entwickelte KI-Verfahren ein, um Betrug mit Kreditkarten und anderen Kreditsystemen zu erkennen.¹⁹⁸ Das System passt

fortlaufend seine eigenen Regeln seinen Erfahrungen entsprechend an. Die First Union Home Equity Bank (in Charlotte, North Carolina) benutzt Loan Arranger, ein ähnliches KI-System, um über Kreditanträge zu entscheiden.¹⁹⁹

NASDAQ benutzt das sogenannte SONAR*-System, um alle Transaktionen auf Betrugsversuche und zum Teil auch Insidergeschäfte zu kontrollieren.²⁰⁰ Bis Ende 2003 hatte SONAR 180 Fälle entdeckt – einige davon waren in den Medien – und an die U.S. Securities and Exchange Commission und das Department of Justice weitergegeben.

Das von Patrick Winston (1972 bis 1997 Leiter des AI Lab des MIT) gegründete Unternehmen Ascent Technology entwickelte ein auf GAs basierendes KI-System mit dem Namen Smart-Airport Operations Center (SAOC). Dieses System kann die komplexe Logistik eines Flughafens optimieren und beispielsweise Arbeitsanweisungen auf die Hunderte von Angestellten verteilen, Gates und Equipment zuteilen und unzählige weitere Details regeln.²⁰¹ Wie Winston bemerkt, ist „herauszufinden, wie man eine komplexe Situation optimiert, genau das, was ein Genetischer Algorithmus tut“. Flughäfen, die SAOC einsetzen, verzeichneten eine Produktivitätssteigerung von 30 Prozent. Der erste Auftrag von Ascent Technology bestand darin, die Logistik für die Operation Desert Storm im Jahre 1991 zu optimieren. Laut der DARPA konnte durch KI-basierte Logistikplanungssysteme mehr Geld gespart werden als die Regierung in Jahrzehnten für KI-Forschung ausgegeben hatte.

Neuerdings wird KI auch eingesetzt um komplexe Software-Systeme zu überwachen, Fehler zu erkennen und diese – nach Möglichkeit ohne menschliches Zutun – zu beheben.²⁰² Diese Idee kam mit der Erkenntnis, dass Softwaresysteme mit zunehmender Komplexität, ähnlich dem Menschen, niemals perfekt sein können, und dass es unmöglich ist, alle Bugs auszumerzen. Als Menschen benutzen wir dieselbe Strategie und versuchen nicht, perfekt zu sein, sondern mit unseren Fehler zu leben. „Wir wollen den Begriff des Systemmanagements völlig umkrempeln“, sagt Armando Fox, Leiter der Software Infrastructures Group der Stanford University, welche sich mit „autonomic computing“ beschäftigt. „Das System muss in der Lage sein, sich selbst aufzusetzen und zu optimieren.“

Es muss sich selbst reparieren, und wenn etwas schief geht, muss es sich gegen externe Bedrohungen schützen können.“ IBM, Microsoft und andere Softwarehersteller arbeiten alle an Systemen mit solchen Automatismen.

Fertigung und Robotik. Computerintegrierte Fertigung („computer-integrated manufacturing“, CIM) setzt zunehmend auf KI bei der Optimierung von Ressourcennutzung, Rationalisierung von Logistik und der Inventarreduzierung durch zeitnahen Erwerb von benötigten Teilen und Werkstoffen. Der Trend geht dabei in Richtung „fallbasiertes Schließen“ anstelle von auf starren Regeln basierenden Expertensystemen. Die ersten Konfigurationen werden in der Regel von Hand vorgenommen, doch dann sind die Systeme bald in der Lage, ihre Erfahrungen auf neue Fälle anzuwenden.

In der industriellen Fertigung werden in großem Stil Roboter eingesetzt. Die Roboter der neuesten Generationen verfügen über maschinelle Sehsysteme, die flexibel auf sich ändernde Umstände reagieren können – ein Entwickler solcher Systeme ist beispielsweise Cognex Corporation (Natick, Massachusetts). Dies vereinfacht die Kalibrierung der Roboter. Brian Carlisle, Firmenchef von Adept Technologies (ein Unternehmen für Fabrikationsautomatisierung in Livermore, Kalifornien): „Selbst wenn menschliche Fabrikarbeiter keine Kosten verursachen würden, spräche noch einiges für Roboter und flexible Automatisierung. Abgesehen von Qualität und Produktionsrate würden die Anwender auch von der schnelleren Veränderlichkeit und Evolution von Produkten profitieren, die mit starren Fertigungsprozessen einfach nicht zu erreichen sind.“

Hans Moravec, ein führender Robotiker und KI-Forscher, gründete ein Unternehmen namens Seegrid, um seine Technik für maschinelles Sehen für Fertigung, Materialverarbeitung und militärische Missionen bereitzustellen.²⁰³ Moravecs Software ermöglicht einem Gerät (einem Roboter oder einem Materialtransporter) durch eine unstrukturierte Umgebung zu gehen oder zu rollen, und in einem einzigen Durchlauf eine „Voxel“-Karte (Voxel sind dreidimensionale Pixel) dieser Umgebung zu erstellen. Mithilfe dieser Karte und seinen eigenen rationalen Fähigkeiten

kann der Roboter dann einen optimalen, hindernisfreien Weg für seine jeweilige Aufgabe wählen.

Diese Technik ermöglicht automatischen Materialtransport in einem Fertigungsprozess, ohne die umfangreichen, für konventionelle, vorprogrammierte Robotersysteme nötigen Vorbereitungen. Auch im militärischen Einsatz können autonome Fahrzeuge Präzisionsarbeit leisten und sich dabei den Umgebungsbedingungen anpassen.

Maschinelles Sehen verbessert auch die Interaktionen von Robotern mit Menschen. Kleine, kostengünstige Kameras können den menschlichen Benutzer lokalisieren und ermöglichen Robotern sowie virtuellen Charakteren auf dem Bildschirm, Augenkontakt mit dem Menschen zu halten – ein entscheidendes Element menschlicher Interaktion.

Kopf- und Augenerkennung wurde unter anderem an der Carnegie Mellon University sowie dem MIT entwickelt, entsprechende Systeme werden von Kleinunternehmen wie Seeing Machines (Australien) vertrieben.

Eine beeindruckende Demonstration von maschinelltem Sehen gab ein Fahrzeug, das fast die komplette Strecke von Washington D. C. bis San Diego ohne menschliches Zutun zurücklegte.²⁰⁴ Wie Bruce Buchanan (University of Pittsburgh), Präsident der American Association of Artificial Intelligence, bemerkte, wäre eine solche Leistung „vor 10 Jahren unvorstellbar“ gewesen.

Das Palo Alto Research Center (PARC) entwickelt eine Roboterschwadron, die sich durch komplexe Umgebungen (zum Beispiel Krisengebiete) bewegen und bestimmte Zielobjekte (zum Beispiel verletzte Menschen) aufspüren kann. Die Forscher führten auf einer KI-Konferenz im September 2004 eine Gruppe selbstorganisierender Roboter in einem künstlichen, aber realistischen Katastrophengebiet vor.²⁰⁵ Die Roboter bewegten sich durch unwegsames Gelände, kommunizierten miteinander und benutzten Bilderkennung und Wärmesensoren um Menschen aufzuspueren.

Sprache. Natürlicher Umgang mit Sprache ist die größte Herausforderung für KI. Mit keinen billigen Tricks, sondern erst durch vollständige

Beherrschung der Prinzipien menschlicher Intelligenz werden Computersystemen in der Lage sein, menschliche Konversation überzeugend zu emulieren, selbst wenn es nur um geschriebene Sprache geht. Dies war Turings Erkenntnis, als er den nach ihm benannten Test per geschriebenem Chat definierte.

Systeme für natürliche Sprachverarbeitung erreichen noch lange kein menschliches Niveau, machen jedoch solide Fortschritte. Suchmaschinen funktionieren so gut, dass sie den Zugang zu Informationen revolutionieren konnten und das Wort „Google(n)“ vom Substantiv zum Verb avancierte. Google und andere Suchmaschinen benutzten KI-basierte statistische Lernmethoden und logisches Schließen, um die Rangordnung der Links zu bestimmen. Die offensichtliche Schwäche von Suchmaschinen ist ihre Unfähigkeit, den Kontext von Wörtern zu verstehen. Ein erfahrener Benutzer ist zwar in der Lage eine Suchanfrage zu formulieren, welche zu den relevanten Ergebnissen führt (die Suche nach „computer chip“ vermeidet im Gegensatz zum Suchwort „chip“ beispielsweise Ergebnisse, die mit Kartoffelchips zu tun haben). Wünschenswert wäre jedoch, mit Suchmaschinen in natürlicher Sprache kommunizieren zu können. Microsoft entwickelte eine Suche namens Ask MSR („Ask MicroSoft Research“), die tatsächlich Fragen in normaler Sprache beantwortet, zum Beispiel „Wann ist Mickey Mantle geboren?“²⁰⁶ Das System zerlegt den Satz zunächst in grammatikalische Elemente (Subjekt, Verb, Objekt, Adjektiv, Adverb und so weiter) und benutzt dann eine spezielle Suchengine um passende Links zu finden. Die gefundenen Dokumente werden nach Sätzen durchsucht, welche die Frage zu beantworten scheinen, und die Antworten in eine Rangliste eingeordnet. In mindestens 75 Prozent der Fälle ist die Antwort unter den ersten drei; falsche Antworten sind in der Regel offenkundig (zum Beispiel „Mickey Mantle wurde 3 geboren“). Die Forscher hoffen, mithilfe von Wissensdatenbanken unsinnige Antworten weiter hinten in der Rangliste platzieren zu können.

Eric Brill, der wissenschaftliche Leiter des Projekts, hat ein noch ambitionierteres Ziel: ein System, das etwa fünfzig Wörter lange Antworten auf komplexere Fragen liefert, wie „Wie werden die Träger des

Nobelpreises bestimmt?“ Eine der Strategie besteht darin, im Netz eine entsprechende FAQ-Sammlung zu finden, welche die Antwort liefert.

Sprecher-unabhängige Spracherkennungssysteme mit einem breiten Vokabular übernehmen mehr und mehr Routineaufgaben im Telefonservice. Mit dem virtuellen Reiseberater von British Airways kann man über alles Mögliche rund um Flugbuchungen sprechen.²⁰⁷ Wer den Kundenservice von Verizon anruft, oder bei Charles Schwab oder Merrill Lynch per Telefon Finanztransaktionen vornimmt, hat es ebenfalls zumeist mit virtuellen Personen zu tun. Diese Systeme können zwar nervig sein, doch sie sind einigermaßen in der Lage, mit den oft doppeldeutigen und fragmentarischen gesprochenen Äußerungen von Menschen umzugehen. Microsoft und andere Unternehmen bieten Systeme an, mit denen Unternehmen virtuelle Agenten erstellen können, die im gesprochenen Dialog mit Kunden Buchungen für Reisen oder Hotels und allerlei andere Routinetransaktionen entgegennehmen.

Nicht jeder Anrufer ist mit diesen virtuellen Agenten zufrieden, darum gibt es in den meisten Systemen auch die Möglichkeit einen Menschen an den Apparat zu bekommen. Doch Unternehmen berichten, dass sie den Bedarf an menschlichen Servicemitarbeitern um bis zu 80 Prozent reduzieren konnten. Abgesehen von den Kostenersparnissen ist die Verkleinerung von Callcentern eine Erleichterung für das Personalmanagement, da Telefonjobs sehr unbeliebt sind und die Mitarbeiterfluktuation daher sehr hoch ist.

Es heißt, Männer fragen ungern andere Leute nach dem Weg. Doch Autohersteller sind überzeugt, dass Männer wie Frauen zumindest ihr eigenes Auto bereitwillig nach der Richtung fragen werden. Der Acura RL und der Honda Odyssey werden 2005 über ein System von IBM verfügen, dass es dem Fahrer erlaubt, mit seinem Auto zu sprechen.²⁰⁸ Das Auto wird Richtungsangaben mit Straßennamen liefern (zum Beispiel „auf der Main Street links, dann rechts an der Second Avenue“). Benutzer können nach dem nächsten italienischen Restaurant fragen oder den genauen Zielort benennen, nach genaueren Angaben fragen und dem Auto Anweisungen erteilen (zum Beispiel „Klimaanlage einschalten“). Der Acura RL wird zudem auf seinem Display Straßenbedingungen und Staus in Echtzeit

anzeigen. Die Spracherkennung soll sprecherunabhängig funktionieren – und ungestört von Motorgeräusch, Wind und dergleichen. Das System soll 1,7 Millionen Straßen- und Stadtnamen sowie fast eintausend Anweisungen verstehen.

Auch Übersetzungsprogramme werden allmählich besser. Da Übersetzung eine Aufgabe auf Turing-Ebene ist – das heißt, sie erfordert vollstes menschliches Sprachverständnis –, wird sie einer der letzten Bereiche sein, in denen das menschliche Niveau erreicht wird. Der Informatiker Franz Josef Och (University of Southern California) hat eine neue Technik entwickelt, mit der sich innerhalb von Stunden oder Tagen ein Übersetzungssystem zwischen zwei beliebigen Sprachen erstellen lässt.²⁰⁹ Dazu wird lediglich ein „Stein von Rosette“ benötigt, also ein Text in einer der Sprachen sowie die Übersetzung in der anderen Sprache – wobei dieser Text Millionen von Wörtern haben muss. Mit einer selbstorganisierenden Technik entwickelt das System dann ein eigenes statistisches Modell davon, wie die eine Sprache in die jeweils andere zu übersetzen ist.

Dies ist ein klarer Unterschied zu anderen Übersetzungssystemen mit langen, von Linguisten in mühsamer Kleinarbeit erstellten Listen grammatikalischer Regeln und Ausnahmen. Ochs System erzielte kürzlich die Höchstwertung in einem Wettbewerb für Übersetzungssysteme, ausgerichtet vom National Institute of Standards and Technology des U.S. Commerce Department.

Sport und Unterhaltung. Torsten Reil (Forscher in Oxford) fand eine amüsante und interessante Anwendung für GAs. Der Forscher erstellte animierte Figuren mit simulierten Gelenken und Muskeln und neuronalen Netzen als Gehirn. Er gab ihnen eine Aufgabe: Laufen lernen. Er benutzte einen etwa 700 Parameter umfassenden GA um diese Fähigkeit zu entwickeln. „Mit menschlichen Augen betrachtet gibt es keine Möglichkeit, das von Hand zu machen, das System ist einfach zu komplex“, erklärt Reil. „Hier kommt die Evolution ins Spiel.“²¹⁰

Während einige Individuen einen gleichmäßigen und überzeugenden Laufstil entwickelten, bewies das Experiment wieder einmal eine altbekannte Eigenschaft von GAs: Man bekommt genau das, wonach man

fragt. Reil: „Wir bekamen einige Kreaturen, die überhaupt nicht gingen, sondern sich auf äußerst merkwürdige Weise fortbewegten: krabbelnd oder in Purzelbäumen.“

Derzeit wird Software entwickelt, die aus einer Sportaufzeichnung automatisch die wichtigsten Ausschnitte extrahiert.²¹¹ Eine Gruppe am Trinity College (Dublin) arbeitet an Software, die in Spielen wie Billard alle Kugelpositionen verfolgt und erkennt, wenn ein bedeutender Spielzug gemacht wurde. Eine Gruppe der Universität Florenz arbeitet an einem System für Fußball, welches die Spieler verfolgt und erkennt, in was für einer Phase sich das Spiel gerade befindet (zum Beispiel Aufbau im Mittelfeld oder Torchance), wann Tore fallen, wann Freistöße gegeben werden und dergleichen.

Die Digital Biology Interest Group des University College in London entwickelt Formel 1-Rennwagen durch GAs.²¹²

Der KI-Winter ist längst vorüber. Wir befinden uns im Frühling der schwachen KI. Die meisten der genannten Beispiele waren vor zehn bis fünfzehn Jahren noch reiner Forschungsgegenstand. Wenn alle KI-Systeme auf der Welt auf einmal den Geist aufgäben, würde die Infrastruktur unserer Wirtschaft lahmgelegt. Banken würden das Geschäft einstellen. Der Transport würde größtenteils stillstehen. Die Kommunikation würde fast vollständig zusammenbrechen. Vor zehn Jahren war das noch nicht der Fall. Natürlich sind unsere KI-Systeme noch nicht intelligent genug, um eine solche Verschwörung auszuhecken. Noch nicht.

Starke KI

Wenn man etwas nur auf eine Weise versteht, versteht man es überhaupt nicht. Denn wenn es irgendwelche Ungereimtheiten gibt, steckt man fest, mit einem einzigen Gedanken im Kopf, von dem es kein Weiter gibt. Die Bedeutung einer Sache ergibt sich daraus, wie wir sie mit all den anderen Dingen, die wir wissen, verknüpft haben. Darum sagen wir, dass jemand, der nur auswendig lernt, kein echtes Verständnis hat. Wenn man jedoch über mehrere Darstellungen einer Sache verfügt, kann man ausweichen, falls eine davon nicht funktioniert. Mit zu vielen undifferenzierten Verknüpfungen wird der Geist natürlich zu Einheitsbrei. Doch gut verknüpfte Darstellungen erlauben uns, Ideen im Geiste zu drehen und zu wenden, und die Dinge aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten, bis wir eine passende finden. Das ist es, was Denken bedeutet.

Die Entwicklung von Computerleistungen ist wie eine allmähliche Überschwemmung. Vor einem halben Jahrhundert begann sie, das Flachland zu überfluten – menschliche Rechner und Buchhalter wurden vertrieben, doch die meisten von uns blieben trocken. Nun hat die Flut bereits die ersten Hügel erreicht und unsere Außenposten dort erwägen die Flucht. Auf den Gipfeln wähen wir uns in Sicherheit, aber bei der derzeitigen Steigungsrate wird auch das Gebirge in einem weiteren halben Jahrhundert überschwemmt sein. Ich schlag vor, dass wir Archen bauen und uns auf ein Leben als Seefahrer einstellen!

Doch zunächst können uns nur unsere Vorposten erzählen, wie sich das Wasser anfühlt. Die Außenposten auf den niedrigeren Hügeln namens Schach und mathematische Beweisführung berichten uns Anzeichen von Intelligenz. Warum haben wir davon nicht schon vor Jahrzehnten erfahren, als die Menschen im Flachland in Sachen Arithmetik und Gedächtnis von Computern überholt wurden? Tatsächlich gab es solche Berichte. Computer, die so schnell wie tausend Menschen (arithmetisch) rechneten, wurden als „Riesengehirne“ gefeiert und inspirierten die erste Generation der KI-Forschung. Schließlich vollbrachten Maschinen etwas, was kein Tier konnte, etwas, wozu menschliche Intelligenz, Konzentration und jahrelange Übung benötigt wurde. Doch heute ist es schwer, die Magie von damals zu spüren. Unter anderem, weil die erwiesene Dummheit von Computern in anderen Bereichen unser Urteil trübt. Ein anderer Grund ist unsere eigene Unzulänglichkeit. Arithmetik oder das Erstellen von Aufzeichnungen sind für uns ein so mühseliger, externer Prozess, dass wir oft nur die kleinen, mechanischen Schritte einer langen Kalkulation im Blick haben, während wir das große Bild nicht sehen. Wie die Entwickler von Deep Blue betrachten wir den Prozess zu sehr von innen heraus, als dass wir seine äußeren Feinheiten wahrnehmen könnten. Doch die Schneestürme und Tornados, welche die repetitive Arithmetik von Wettersimulationen sichtbar macht, oder die faltige Tyrannosaurushaut in einer errechneten Filmanimation, haben etwas Nicht-Offensichtliches. Wir nennen es selten Intelligenz, doch „künstliche Realität“ ist möglicherweise ein noch profunderes Konzept als künstliche Intelligenz.

Die geistigen Schritte, die hinter menschlichem Schachspiel oder dem Auffinden eines Beweises für ein Theorem stecken, sind komplex und verborgen, außer Reichweite für maschinelle Interpretation. Diejenigen, die diesem Spiel zu folgen vermögen, beschreiben es natürlich stattdessen durch mentalistische Begriffe wie Strategie, Verständnis und Kreativität. Wenn es einer Maschine gelingt, bedeutungsvolle und zugleich überraschende Äußerungen zu produzieren, wird für sie ebenfalls eine mentalistische Interpretation erforderlich. Natürlich gibt es irgendwo hinter den Kulissen auch Programmierer mit einer mechanischen Erklärung. Doch auch sie kommen mit dieser Interpretation nicht weiter, wenn das laufende Programm seinen Speicher mit einer nicht mehr fassbaren Menge an Details füllt.

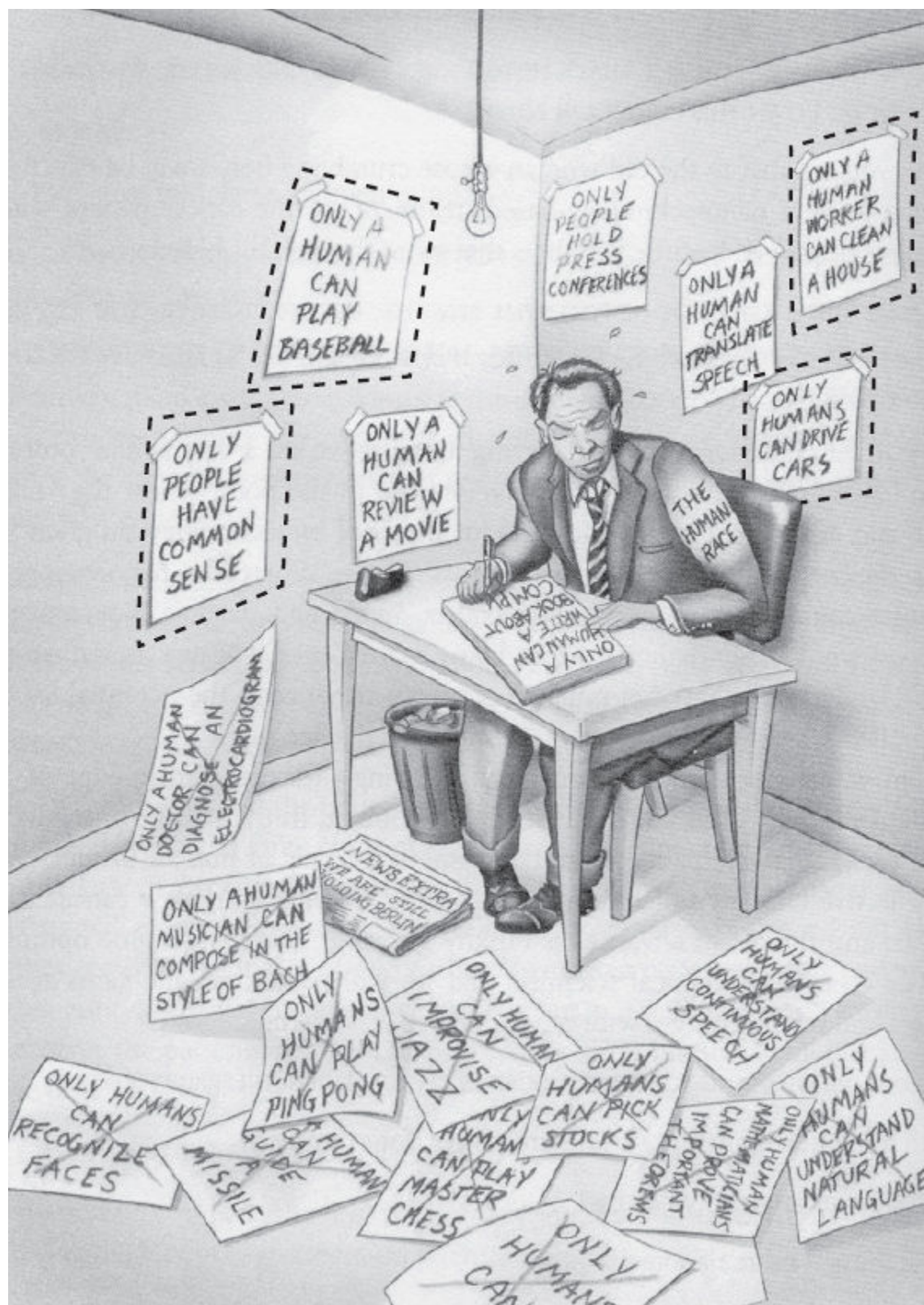
Wenn die Flut die dichter besiedelten Vorberge erreicht, werden Maschinen sich in Bereichen behaupten, die von einer größeren Anzahl von Menschen wahrgenommen werden. Das Bauchgefühl, dass in Maschinen etwas Denkendes steckt, wird sich immer weiter verbreiten. Wenn die höchsten Gipfel unter Wasser stehen, können Maschinen in allen Bereichen genauso intelligent handeln wie Menschen. Dann wird selbstverständlich sein, dass Maschinen einen Geist* haben.

Aufgrund der exponentiellen Wachstumsraten steigern sich Informationstechniken häufig sehr schnell von einer eher armseligen Leistungsfähigkeit auf ein imposantes Level. Wie die Beispiele im letzten Abschnitt zeigen, hat schwache KI bereits ein solches Level erreicht. Die Liste von Bereichen, in denen sich Maschinen mit menschlicher Intelligenz messen können, wird immer länger. Eine Karikatur aus *The Age of Intelligent Machines* zeigt eine ins Schwitzen geratene „human race“ (Rasse der Menschen), die auf Plakate schreibt, zu welchen Dingen allein Menschen (und nicht Maschinen) fähig sind.²¹⁵ Auf dem Boden verstreut liegen Plakate, die ungültig wurden, weil Maschinen mittlerweile die entsprechenden Tätigkeiten verrichten können: Elektrodiagramme diagnostizieren, im Stil von Bach komponieren, Gesichter erkennen, Raketen lenken, Tischtennis spielen, auf Meisterniveau Schach spielen, Aktien auswählen, Jazz improvisieren, wichtige Theoreme beweisen und gesprochene Sprache verstehen. Bereits 1999 waren dies keine exklusiven Disziplinen der menschlichen Intelligenz mehr; sie wurden allesamt auch von Maschinen bewältigt.

An der Wand hinter dem Plakatschreiber hängen einige Plakate mit Aufgaben, die noch als Bastionen der menschlichen Intelligenz gelten: allgemeiner Menschenverstand, Filmkritiken verfassen, Pressekonferenzen geben, Sprachen übersetzen, sauber machen und Autos fahren. Würde man die Karikatur heute zeichnen, würden wohl auch einige dieser Plakate auf dem Boden landen. Wenn CYC erst einmal über einhundert Millionen Informationseinheiten verfügt, wird die Sache mit dem allgemeinen Menschenverstand vielleicht nicht mehr so klar liegen.

Die Ära der Haushaltsroboter, obschon sie noch recht primitiv sind, hat bereits begonnen. In zehn Jahren werden wahrscheinlich Maschinen in unseren Häusern „klar Schiff machen“ können. Was Autofahren betrifft, haben Maschinen die USA bereits fast komplett durchquert – ohne menschliches Zutun, auf gewöhnlichen Straßen und bei normalem Verkehr. Noch lassen wir Maschinen nicht an jedes Lenkrad, doch es gibt ernsthafte Überlegungen zu elektronischen Autobahnen, auf denen Autos (mit menschlichen Insassen) ganz von alleine fahren.

Die drei Aufgaben, die mit Sprachverständnis zu tun haben – Filmkritik, Pressekonferenz und Übersetzung – sind am schwierigsten. Sobald diese Plakate abgehängt werden, haben wir Turing-fähige Maschinen und die Ära der starken KI beginnt.



Dieser Übergang wird schleichend herannahen. Solange es noch Bereiche gibt, in denen KI der menschlichen Intelligenz nachsteht, werden sich Skeptiker an diese Diskrepanzen klammern. Doch letztlich wird es uns mit allen Fähigkeiten und Kenntnissen ergehen wie Kasparov. Sobald in den jeweiligen Bereichen die Biegung der exponentiellen Wachstumskurve erreicht ist, werden sich die dürftigen Maschinenleistungen schnell auf ein hohes Niveau steigern.

Wie wird starke KI zustande kommen? Der größte Teil dieses Buches soll die Soft- und Hardware-Grundvoraussetzungen beschreiben und darlegen, wieso wir zuversichtlich sein können, dass künftige nichtbiologische Systeme diese Voraussetzungen erfüllen werden. Im Jahre 1999 war noch umstritten, ob das exponentielle Wachstum der Preis-Leistung von Berechnung andauern und die nötige Hardware für eine Emulation menschlicher Intelligenz hervorbringen würde. Doch die enormen Fortschritte mit dreidimensionaler Chiptechnik in den letzten fünf Jahren haben die meisten Zweifel beseitigt. Schon im Rahmen der bis 2018 ausgelegten ITRS Roadmap der Halbleiterindustrie wird Hardware mit ausreichender Leistung verfügbar werden.²¹⁶

In **Kapitel 4** habe ich dargelegt, weshalb wir davon ausgehen können, dass bis Ende der 2020er detaillierte Modelle und Simulationen aller Gehirnregionen bereitstehen werden. Bis vor Kurzem mangelte es unseren Werkzeugen zur Erkundung des Gehirns noch an räumlicher und zeitlicher Auflösung, Bandbreite oder Preisleistung, um angemessene Daten für ausreichend detaillierte Modelle zu sammeln. Doch das ändert sich nun. Die kommenden Generationen von Scan- und Messinstrumenten können Neuronen und neuronale Verbindungen mit großer Genauigkeit und in Echtzeit abbilden.

Zukünftige Technik wird über weitaus mehr Auflösung und Kapazität verfügen. In den 2020ern werden wir Nanobots durch unsere Kapillaren schicken können um das Gehirn von innen zu untersuchen. Wir haben uns als fähig erwiesen, die Daten aus den verschiedenen Quellen zu Modellen und Computersimulationen zu integrieren, welche im experimentellen Vergleich mit den biologischen Versionen der jeweiligen Hirnregionen gut abschneiden. Wir haben bereits überzeugende Modelle und Simulationen

für mehrere wichtige Gehirnregionen. Wie in **Kapitel 4** beschrieben ist – vorsichtig geschätzt – bis Ende der 2020er mit detaillierten, realistischen Modellen für alle Gehirnregionen zu rechnen.

Das Szenario der starken KI ist kurz gesagt folgendes: Durch Reverse Engineering aller Gehirnregionen werden wir die Funktionsprinzipien der menschlichen Intelligenz in Erfahrung bringen und diese Prinzipien in den hirnsimulationstauglichen Computer-Plattformen der 2020er zur Anwendung bringen. Wir verfügen bereits über sehr effektive Methoden der schwachen KI. Durch die fortlaufende Verbesserung dieser Methoden, die Entwicklung neuer Algorithmen und die Kombination verschiedener Methoden in komplexen Architekturen wird schwache KI immer weniger schwach. Das heißt, schwache KI wird flexibler und hat immer breitere Anwendungsbereiche. KI-Systeme werden Probleme von mehreren Seiten gleichzeitig angehen können – so wie Menschen es tun. Vor allen Dingen aber werden die Erkenntnisse aus der Gehirnforschung unser Arsenal an KI-Methoden drastisch und kontinuierlich erweitern. Dieser Prozess ist bereits in vollem Gange.

Oft heißt es, das Gehirn sei kein Computer, und deshalb könnten wir Erkenntnisse über Gehirnfunktionen nicht auf nichtbiologische Systeme übertragen. Dabei bleibt das komplette Feld der selbstorganisierenden Systeme und die entsprechende mathematische Theorie außer Acht. Einige Unterschiede zwischen dem Gehirn und konventionellen Computern habe ich im vorigen Kapitel beschrieben. Wenn man seinen Palm Pilot aufschraubt und ein Kabel durchtrennt, wird er höchstwahrscheinlich nicht mehr funktionieren. Unser Gehirn verliert dagegen regelmäßig Neuronen und Verbindungen, ohne beeinträchtigt zu werden – weil es selbstorganisierend ist und mit verteilten Mustern arbeitet, in denen einzelne Details entbehrlich sind.

Gegen Mitte oder Ende der 2020er werden uns extrem detaillierte Modelle von Gehirnregionen zur Verfügung stehen. Solche Modelle und Simulationen werden unseren Software-Werkzeugkasten stark bereichern und eine vollständige Erklärung für die Funktionsweise des Gehirns herbeiführen. Dieser Werkzeugkasten für intelligente Aufgaben umfasst dann Methoden, die ein direktes Reverse Engineering des Gehirns

darstellen, andere, die lediglich durch Wissen über das Gehirn inspiriert sind, und auch Methoden, die in jahrzehntelanger KI-Forschung entstanden sind und überhaupt nichts mit dem Gehirn zu tun haben.

Das Gehirn erwirbt einen großen Teil seines Wissens durch Lernen, nur ein kleiner Teil ist fest einprogrammiert (wir sprechen von „Instinkten“). Auch in der KI wird Lernen eine wichtige Rolle spielen. Nach meinen Erfahrungen ist der schwierigste und wichtigste Abschnitt bei der Entwicklung von Mustererkennungssystemen für Schrift- und Spracherkennung und Finanzanalysen das Training der KI. Künftigen KIs wird dafür das gesammelte Wissen der menschlichen Zivilisation online zur Verfügung stehen.

Das Training von KIs wird viel schneller gehen als das von nicht-unterstützten Menschen. Die zwanzigjährige Zeitspanne, die biologische Menschen für ihre Grundausbildung benötigen, könnte auf einige Wochen oder weniger komprimiert werden. Da nichtbiologische Intelligenz erlernte Muster direkt weitergeben kann, reicht es zudem aus, wenn eine einzige KI den Lernprozess durchläuft. Wie zuvor erwähnt, haben wir unsere Spracherkennungssoftware auf einigen wenigen Computern trainiert, worauf Hunderttausende Benutzer das fertige Programm mit den erlernten Mustern einfach herunterladen konnten.

Eine der vielen Fähigkeiten, über welche nichtbiologische Intelligenz nach dem Abschluss des Reverse Engineering des Gehirns verfügen wird, ist ein ausreichendes Sprachverständnis und Allgemeinwissen, um den Turing-Test zu bestehen. Der Turing-Test ist weniger von praktischer Bedeutung, als dass er eine kritische Schwelle der KI-Entwicklung markiert. Wie zuvor erläutert, ist der einzige Weg, den Turing-Test zu bestehen, eine überzeugende Emulation menschlicher Intelligenz in ihrer vollen Flexibilität, Feinsinnigkeit und Eleganz. Ist eine solche Emulation einmal gelungen, werden wir uns daran machen, sie zu konzentrieren und zu verstärken.

Es gibt einige Variationen des Turing-Tests. Im Wettbewerb um den Loebner-Preis wird jährlich eine Bronzemedaille für den überzeugendsten Chatbot (ein Konversationsprogramm) vergeben.²¹⁷ Die Kriterien für Silber sind die des ursprünglichen Turing-Tests – die Silbermedaille wurde daher

noch nie verliehen. Die Goldmedaille schließlich gibt es für audiovisuelle Kommunikation, das heißt, die KI muss ein Gesicht und eine Stimme haben, die so überzeugend sind, dass die Juroren in einer Videoübertragung glauben, es mit einer echten Person zu tun zu haben. Auf den ersten Blick scheinen die Kriterien für die Goldmedaille am härtesten. Ich wende jedoch ein, dass Gold womöglich leichter zu erreichen sein könnte als Silber, da die Schiedsrichter möglicherweise durch Stimme und Gesicht abgelenkt sind und weniger auf den sprachlichen Inhalt achten. Es gibt bereits Gesichtsanimationen in Echtzeit – sie entsprechen zwar noch nicht ganz den Turing-Kriterien, kommen ihnen jedoch einigermaßen nahe. Wir verfügen auch über sehr realistische Sprachsynthese, die menschlichen Aufnahmen oft zum Verwechseln ähnlich ist – allerdings muss noch an der Intonation gearbeitet werden. Realistische Gesichtsanimation und Sprachsynthese werden wahrscheinlich früher möglich werden als sprachliche Fähigkeiten und Allgemeinwissen auf Turing-Niveau.

Turing ließ bei der Definition seines Tests bewusst einiges offen, und seither gab es eine Vielzahl an Veröffentlichungen, die sich mit den genauen Regeln für den Testablauf beschäftigen.²¹⁸ Ich handelte 2002 mit Mitch Kapor die Regeln für eine Turing-Test-Wette auf der Long Now-Webseite aus.²¹⁹ Der Einsatz waren zwanzigtausend Dollar (zu spenden an eine karitative Einrichtung, die der Gewinner benennt) und die Wette drehte sich um die Frage: „Werden Maschinen bis 2029 den Turing-Test bestanden haben?“ Ich sagte ja, Kapor sagte nein. Wir führten einen monatelangen Dialog, um die genauen Regeln der Wette festzulegen. Schon die Begriffe „Mensch“ und „Maschine“ waren nicht ganz leicht zu definieren. Dürfen im Gehirn eines biologischen Schiedsrichter nichtbiologische Denkprozesse ablaufen? Darf eine Maschine biologische Komponenten haben?

Da die Definitionen des Turing-Tests variieren, werden Turing-fähige Maschinen nicht von heute auf morgen erscheinen. Eine Zeit lang werden wir Behauptungen aus verschiedenen Richtungen hören, eine Maschine hätte den Test bestanden, und fachkundige Beobachter (vermutlich einschließlich mir) werden diesen Behauptungen immer wieder widersprechen. Zu dem Zeitpunkt, an dem ein breiter Konsens herrscht,

dass der Test bestanden wurde, wird die eigentliche Entwicklungsschwelle längst überschritten worden sein.

Edward Feigenbaum schlägt eine Variation des Tests vor, in der Maschinen nicht einen gewöhnlichen, alltäglichen Dialog führen, sondern als Experte auf einem wissenschaftlichen Feld durchgehen müssen.²²⁰ Der Feigenbaum-Test (FT) ist möglicherweise bedeutsamer als der Turing-Test, da FT-fähige Maschinen technische Fähigkeiten mitbringen und somit in der Lage sind, an ihrer eigenen Verbesserung zu arbeiten. Feigenbaum beschreibt seinen Test folgendermaßen:

Zwei Spieler spielen das FT-Spiel. Einer der Spieler ist ein ausgewählter Experte auf einem von drei vorher festgelegten Feldern aus Naturwissenschaft, Technik oder Medizin. (Es könnten mehr sein, aber in diesem Zusammenhang nicht mehr als zehn). Sagen wir, wir wählen aus den Feldern der U.S. National Academy aus. [...] Wir könnten zum Beispiel Astrophysik, Informatik und Molekularbiologie wählen. In jeder Runde des Spiels wird das Verhalten der beiden Spieler (wissenschaftlicher Experte und Computer) von anderen, auf diesem Gebiet bewanderten Mitgliedern der Academy bewertet, ein Astrophysiker beurteilt beispielsweise das Verhalten in einem Gespräch über Astrophysik. Natürlich ist wie beim Turing-Test die Identität der beiden Spieler unbekannt. Der Beurteiler stellt Probleme und Fragen, fragt nach Erklärungen, Theorien und so weiter – so wie mit einem Kollegen. Kann der Beurteiler mit einer Trefferwahrscheinlichkeit, die zufälliges Raten übersteigt, entscheiden, wer sein Kollege von der National Academy ist, und wer der Computer?

Feigenbaum ignoriert dabei natürlich die Möglichkeit, dass Computer bereits selbst Mitglied der National Academy sind – offenbar geht er davon aus, dass Maschinen noch nicht in die Institutionen vorgedrungen sein werden, die heute ausschließlich biologischen Menschen vorbehalten sind. Der FT mag zunächst härter erscheinen, als der Turing-Test, doch ein Blick in die Geschichte der KI zeigt, dass Maschinen bei Expertenwissen begannen und sich erst allmählich den sprachlichen Fähigkeiten eines Kindes annäherten. Frühere KI-Systeme bewiesen ihr Können in professionellen Bereichen wie dem Beweisen mathematischer Theoreme oder medizinischer Diagnosen. Doch diese Systeme würden den FT nicht bestehen, da es ihnen sowohl an sprachlichen Fähigkeiten als auch an der Fähigkeit, Modellwissen flexibel und in verschiedenen Perspektiven in einem professionellen Dialog einzubringen, fehlt.

Diese sprachlichen Fähigkeiten sind auch im Turing-Test gefordert. Wissenschaftliche Argumentation ist nicht unbedingt komplizierter als der Alltagsdiskurs der meisten erwachsenen Menschen. Ich würde erwarten,

dass Maschinen, zu dem Zeitpunkt, an dem sie den Turing-Test bestehen, auch den FT bestehen, zumindest in manchen Disziplinen. Bis sie den FT in allen Disziplinen bestehen, wird es allerdings länger dauern. Darum sehe ich die 2030er als Konsolidierungsphase, in der die Maschinenintelligenz schnell ihre Fähigkeiten erweitert und den Wissensschatz unserer Mensch-Maschinen-Zivilisation erfasst. In den 2040ern können wir dann sämtliche Fähigkeiten und das ganze Wissen der Zivilisation auf Computer-Plattformen einsetzen, welche Milliarden Mal leistungsfähiger sind als nicht-unterstützte biologische Intelligenz.

Das Auftreten von starker Intelligenz wird die wichtigste Transformation in diesem Jahrhundert darstellen. Es ist in seiner Bedeutung vergleichbar mit der Entstehung des biologischen Lebens. Es wird bedeuten, dass die Natur sich ihrer eigenen Intelligenz bemächtigt und ein Mittel gefunden hat, über sich selbst hinauszuwachsen. Wenn die Funktionsweise der menschlichen Intelligenz verstanden ist, wird diese Intelligenz durch menschliche Forscher und Techniker erweitert werden, deren biologische Intelligenz wiederum durch Ergänzung mit nichtbiologischer Intelligenz massiv erweitert wird. Mit der Zeit wird der nichtbiologische Anteil überhandnehmen.

Im nächsten Kapitel werde ich die Auswirkungen dieser Transformation besprechen – einige haben wir schon kennengelernt. Intelligenz ist die Fähigkeit, mit limitierten Ressourcen und in beschränkter Zeit Probleme zu lösen. Die Singularität wird geprägt sein von einem schnellen Zyklus zunehmend nichtbiologischer menschlicher Intelligenz, die in der Lage ist, ihre eigenen Fähigkeiten zu verstehen und zu vervielfachen.

FREUND EINES VISIONÄREN BAKTERIUMS, 2 MRD. V. CHR.: *Erzähl noch mal von deinen Zukunftsvisionen.*

DAS VISIONÄRE BAKTERIUM, 2 MRD. V. CHR.: *Nun, ich sehe Bakterien, die Gemeinschaften bilden: große Bakterienverbände, die sich jeweils wie ein einziger komplizierter Organismus mit enormen Fähigkeiten verhalten.*

FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: *Wie kommst du denn darauf?*

DAS VISIONÄRE BAKTERIUM: Nun, Kollege Daptobakter bildet bereits Zweierteams mit größeren Bakterien, indem er sich in ihrem Inneren ansiedelt.²²¹ Es ist unausweichlich, dass wir uns zusammentun und spezialisieren. Bisher muss jeder von uns alles alleine machen: Nahrung finden, Verdauen und die Abfallprodukte loswerden.

FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: Und dann?

DAS VISIONÄRE BAKTERIUM: Diese ganzen Zellen werden Wege der Kommunikation finden, die über den Austausch von Chemikalien, den wir beide betreiben, hinausgehen.

FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: Okay – jetzt erzähl mir noch mal den Part mit den Riesendingern aus zehn Billionen Zellen.

VISIONÄRES BAKTERIUM: Ja, also, meinen Modellen zufolge gibt es ungefähr in zwei Milliarden Jahren Organismen aus jeweils zehn Billionen Zellen – darunter zehn Milliarden Spezialzellen, die in äußerst komplizierten Mustern kommunizieren.

FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: Was denn für Muster? Visionäres Bakterium: „Musik“ zum Beispiel. Diese großen Zellverbände werden musikalische Muster erzeugen und sie an andere Zellverbände kommunizieren.

FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: Musik?

VISIONÄRES BAKTERIUM: Ja, bestimmte Schallmuster.

FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: Schall?

VISIONÄRES BAKTERIUM: Okay, sagen wir es so: Diese Superzellverbände werden kompliziert genug sein, um ihren eigenen Aufbau zu verstehen – und zu verbessern. Sie werden immer schneller immer besser werden und den Rest der Welt nach ihrem Abbild umformen.

FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: Moment mal. Das klingt als würden wir unsere Bakterlichkeit verlieren.

VISIONÄRES BAKTERIUM: Ja, aber das wird kein Verlust sein. FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: Das sagst du immer, aber...

VISIONÄRES BAKTERIUM: Es wird ein großer Schritt vorwärts sein. Unsere Bestimmung als Bakterien. Außerdem wird es auch weiterhin Einzeller wie uns geben.

FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: *Okay, aber was ist mit der Kehrseite der Medaille? Ich meine, Kollege Daptobakter und Bdellovibrio können nicht viel Schaden anrichten, aber diese zukünftigen Zellverbände könnten mir ihrer gigantischen Reichweite alles zerstören!*

VISIONÄRES BAKTERIUM: *Man kann nicht sicher sein, aber ich glaube wir werden durchkommen.*

FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: *Du warst schon immer ein Optimist.*

VISIONÄRES BAKTERIUM: *Auf jeden Fall müssen wir uns in den nächsten paar Milliarden Jahren noch keine Sorgen machen.*

FREUND DES VISIONÄREN BAKTERIUMS: *Okay, dann lass uns jetzt zu Mittag essen.*

ZWEI MILLIARDEN JAHRE SPÄTER...

NED LUDD: *Diese zukünftigen Intelligenzen werden schlimmer sein als die Textilmaschinen, mit denen ich es damals im Jahre 1812 zu tun hatte. Damals hatten wir Sorgen, weil eine Maschine die Arbeit von zwölf Männern übernahm. Aber du sprichst von einer Maschine, nicht größer als eine Murmel, welche die gesamte Menschheit aussticht!*

RAY: *Sie wird nur den biologischen Teil der Menschheit übertreffen. Auch die Murmelmaschine wird menschlich sein, wenn auch nicht biologisch.*

NED: *Die Superintelligenz wird nicht essen. Sie wird nicht atmen. Sie wird keinen Sex haben... Was ist dann an ihr noch menschlich?*

RAY: *Wir werden mit unserer Technik verschmelzen. Damit beginnen wir schon im Jahre 2004. Die meisten Maschinen befinden sich zwar noch außerhalb von Gehirn und Körper, doch sie erweitern schon jetzt den Radius unserer Intelligenz. Unsere Reichweite zu vergrößern lag schon immer in unserer menschlichen Natur.*

NED: *Wenn du behauptest, diese superintelligenten, nichtbiologischen Entitäten wären menschlich, heißt das, dass wir im Vergleich dazu nur Bakterien sind. Denn genauso haben wir uns aus Bakterien entwickelt.*

RAY: *Der heutige Mensch ist eine Ansammlung von Zellen und derzeit das Spitzenprodukt der Evolution – das stimmt. Aber der nächste Schritt der Evolution besteht in der Erweiterung unserer Intelligenz: Reverse Engineering, Modellierung, Simulation, Rekonstruktion auf leistungsstärkeren Plattformen, Modifikation und Erweiterung. Die Bakterien waren dazu bestimmt, sich zu einer Technik schaffenden Spezies zu entwickeln. Unsere Bestimmung ist es, uns zu der enormen Intelligenz der Singularität zu entwickeln.*

KAPITEL 6

Die Folgen...

[D]ie Zukunft [tritt] in solcher Weise in uns [ein], um sich in uns zu verwandeln, lange bevor sie geschieht.

RAINER MARIA RILKE

Eines der größten Missverständnisse bezüglich der Zukunft ist, dass die Zukunft etwas sei, das uns widerfährt, und nicht etwas, dass wir erschaffen.

MICHAEL ANISSIMOV

„Gott zu spielen“ ist die höchste Ausprägung der menschlichen Natur. Das Bestreben uns selbst zu verbessern, unsere Umwelt zu beherrschen und unsere Kinder auf den bestmöglichen Weg zu schicken sind grundlegende Triebkräfte der gesamten menschlichen Geschichte. Ohne die Bestrebungen „Gott zu spielen“ würde die Welt, wie wir sie kennen, heute nicht existieren. Ein paar Millionen Menschen würden sich in Savannen und Wäldern als Jäger und Sammler durchschlagen, ohne Schrift, Geschichte, Mathematik oder einem Erkennen der komplexen Feinheiten ihres Universums oder ihres eigenen Innenlebens.

RAMEZ NAAM

Esin Ausblick. Wie wird die menschliche Erfahrungswelt aussehen, wenn nichtbiologische Intelligenz überwiegt? Was bedeutet es für die Mensch-Maschinen-Zivilisation, wenn starke KI und Nanotechnik *alle nur vorstellbaren* Produkte, Situationen und Umgebungen erzeugen können? Ich betone hier die Vorstellungskraft, denn sie wird der limitierende Faktor unseres Schaffens sein – die Mittel, um unsere Vorstellungskraft zu vergrößern, wachsen jedoch exponentiell.

Mit dem Herannahen der Singularität müssen wir unsere Begriffe bezüglich der Natur des menschlichen Lebens überdenken und unsere menschlichen Institutionen neu gestalten. Auf einige dieser Begriffe und Institutionen wollen wir in diesem Kapitel eingehen.

Die drei ineinandergreifenden Revolutionen G, N und R werden beispielsweise unsere gebrechlichen menschlichen Körper der Version 1.0

in eine sehr viel beständigere und leistungsstärkere Version 2.0 überführen. Milliarden von Nanobots werden sich durch unsere Blutgefäße und unser Gehirn bewegen. Sie werden in unseren Körpern Krankheitserreger zerstören, Genfehler korrigieren, Schadstoffe eliminieren und viele andere Dinge tun um unser physisches Wohlergehen zu gewährleisten. Als Ergebnis werden wir ewig leben können, ohne zu altern.

In unserem Gehirn verteilte Nanobots werden mit unseren biologischen Neuronen interagieren. Dadurch wird eine vollständige virtuelle Realität geschaffen werden, die sowohl all unsere Sinne als auch die neuronalen Ausprägungen unserer Emotionen erfasst. Vor allen Dingen wird diese enge Verknüpfung von biologischem und nichtbiologischem Denken die menschliche Intelligenz entscheidend vergrößern.

Die Kriegführung wird zu Nanobots und Cyberwaffen übergehen. Wir werden zunächst online lernen, doch sobald unsere Gehirne online sind, können wir Wissen und Können direkt herunterladen. Arbeit wird bedeuten, neues Wissen verschiedenster Art zu schaffen, von Musik über Kunst bis Mathematik und Naturwissenschaft. Auch in Spielen wird die Herausforderung darin bestehen, neues Wissen zu erschaffen – darum wird es keine klare Unterscheidung zwischen Arbeit und Spiel geben.

Die Intelligenz auf und im Umkreis der Erde wird exponentiell weiterwachsen, bis das Berechnungspotenzial von Materie und Energie erschöpft ist. Wenn wir in unserer Ecke der Galaxie an diese Grenze stoßen, wird sich die Intelligenz unserer Zivilisation schnell auf den Rest des Universums ausbreiten – mit der größtmöglichen Geschwindigkeit. Nach unserem derzeitigen Verständnis ist dies die Lichtgeschwindigkeit, doch es gibt Hinweise darauf, dass wir dieses Limit umgehen können (zum Beispiel lassen sich möglicherweise Abkürzungen durch Wurmlöcher nehmen).

...für den menschlichen Körper

So viele verschiedene Menschen, die man sein kann.

Cosmetic Baby, stöpsel dich bei mir ein
und finde niemals einen anderen.
Und mir wird klar, niemand durchschaut
meine(n) fantastische(n) Plastik-Geliebte(n).

JEFFERSON AIRPLANE, „PLASTIC FANTASTIC LOVER“

Unsere Maschinen werden uns viel ähnlicher werden und wir werden unseren Maschinen viel ähnlicher werden.

RODNEY BROOKS

Einmal jenseits der Natur, nehme ich niemals
Meine Körpergestalt nach Vorbild der Natur,
Sondern eine Gestalt, wie griechische Goldschmiede sie machen
Aus getriebenem Gold und mit Gold verziert.

WILLIAM BUTLER YEATS, „SAILING TO BYZANTIUM“

Eine radikale Aufbesserung der physischen und mentalen Systeme unseres Körpers ist bereits im Gange, und zwar durch Biotechnik und Neuentwicklungen der Gentechnik. Nach Ablauf der nächsten beiden Jahrzehnte werden wir Nanotechnik einsetzen um unsere Organe zu verbessern und letztendlich zu ersetzen.

Eine neue Art zu essen. Sex ist heute weitgehend von seiner biologischen Funktion losgelöst. Sexuelle Aktivität ist zumeist ein Mittel der intimen Kommunikation und des sinnlichen Genusses, nicht der Reproduktion. Auf der anderen Seite verfügen wir über mehrere Methoden Kinder zu zeugen, ohne Sex zu haben – wobei in den meisten Fällen Reproduktion noch über einen Geschlechtsakt abläuft. Diese Entzweiung von Sex und seiner biologischen Funktion wird nicht von allen Teilen der Gesellschaft gebilligt, wird jedoch (in entwickelten Ländern) von einer breiten Mehrheit bereitwillig und mitunter begeistert begrüßt.

Wie jedes andere größere System des menschlichen Körpers ist die Verdauung erstaunlich komplex. Sie ermöglicht uns unter stark schwankenden Bedingungen die komplexen Ressourcen zu extrahieren, die wir zum Überleben brauchen, und filtert dabei eine Vielzahl an Schadstoffen. Unser Wissen um die komplexen Abläufe der Verdauung wächst schnell, doch noch gibt es viel zu erforschen.

Wir wissen jedoch, dass unsere Verdauungsprozesse auf einen Abschnitt unserer Entwicklung optimiert sind, der sich drastisch von der Zeit, in der wir heute leben, unterscheidet. Während des größten Teils unserer Entwicklungsgeschichte mussten wir ständig damit rechnen, dass die nächste Sammel- oder Jagdsaison (beziehungsweise, während einer kurzen Phase: die nächste Ernte) katastrophal knapp ausfällt. Darum war es sinnvoll, dass unser Körper versuchte Kalorien zu sparen, wo es nur ging. Heute ist diese biologische Strategie kontraproduktiv – eine unzeitgemäße Stoffwechselprogrammierung, die für die derzeitige Übergewichtsepidemie verantwortlich ist und degenerative Erkrankungen begünstigt, beispielsweise koronare Herzkrankheit und Typ-2-Diabetes.

Man muss sich nur klar machen, weshalb die Konzeption unserer Verdauung und anderer Körpersysteme unter den heutigen Bedingungen alles andere als optimal ist. Bis vor Kurzem (im Zeitrahmen der Evolution betrachtet) war es nicht im Interesse der Spezies, das alte Menschen wie ich (geboren 1948) die begrenzten Ressourcen ihrer Sippe verbrauchten. Die Evolution begünstigte eine kurze Lebensspanne – noch vor zwei Jahrhunderten lag die Lebenserwartung bei siebenunddreißig –, um die knappen Ressourcen den Jüngeren vorzubehalten, sowie ihren Versorgern und denen, die stark genug sind, um harte physische Arbeit zu leisten. Wie zuvor besprochen steht die sogenannte Großmutterhypothese (welche besagt, dass eine kleine Anzahl „weiser“ Stammesältester der menschlichen Spezies zuträglich war) nicht im Widerspruch zu der Beobachtung, dass es keinen starken Selektionsdruck für Gene gab, welche die menschliche Lebenserwartung erhöhen.

Heute leben wir, zumindest in technisch entwickelten Ländern, in einer Zeit des materiellen Überflusses. Die meisten Arbeiten erfordern geistige anstatt körperlicher Anstrengung. Vor einem Jahrhundert waren 30 Prozent der Arbeitskräfte in den USA auf Bauernhöfen beschäftigt, weitere 30 Prozent in Fabriken. Heute liegen diese beiden Anteile bei unter 3 Prozent.² Die meisten der heutigen Berufszweige, von Fluglotse bis Webdesigner, existierten vor hundert Jahren einfach nicht. In der heutigen Zeit haben wir die Möglichkeit weit über die Erziehung unserer Kinder hinaus zum

exponentiell wachsenden Wissensschatz unserer Zivilisation beizutragen – dies ist ein einzigartiges Attribut unserer Spezies.

Wir haben unsere Lebenserwartung mithilfe unserer Technik bereits deutlich gesteigert: Medikamente, Ergänzungsmittel, Ersatzteile für praktisch alle Teilsysteme unseres Körpers und viele weitere Arten des medizinischen Eingriffs. Es gibt Prothesen für Hüfte, Knie, Schulter, Ellenbogen, Handgelenk, Kiefer, Zähne, Haut, Arterien, Venen, Herzklappen, Arme, Beine, Füße, Finger, Zehen – und Systeme für komplexere Organe (beispielsweise das Herz) befinden sich auf dem Vormarsch. Indem wir die Funktionsprinzipien des menschlichen Körpers und Gehirns ergründen, werden wir bald in der Lage sein, deutlich überlegene Systeme zu entwickeln, die länger halten und mehr leisten – ohne Anfälligkeit für Krankheiten und Alter.

Ein Konzeptentwurf für ein solches System mit dem Titel *Primo Posthuman* stammt von der Künstlerin Natasha Vita-More.³ Ihr Entwurf zielt auf maximale Mobilität, Flexibilität und Langlebigkeit. Er beinhaltet unter anderem ein Metagehirn für globale Netzanbindung, einen künstlichen, KI-entwickelten, mit Nanobots verwobenen Neokortex, sonnenresistente intelligente Haut mit Biosensoren, die Teint und Textur verändern kann, und hochscharfe Sinnesorgane.

Der menschliche Körper 2.0 ist ein laufendes Projekt, das letztendlich zu einer radikalen Aufbesserung unserer physischen und mentalen Systeme führen wird. Doch die Umsetzung wird sich in kleinen Schritten über einen längeren Zeitraum verteilen. Mit unserem heutigen Wissen ist bereits absehbar, auf welchem Weg wir jeweils die einzelnen Aspekte dieser Vision in die Tat umsetzen werden.

Neugestaltung des Verdauungssystems. Nun zurück zum Verdauungssystem. Wir haben bereits ein umfassendes Bild von den Komponenten unserer Nahrung. Wir können Menschen, die nicht selbst essen können, flüssig ernähren. Das ist jedoch keine wünschenswerte Alternative, da unsere Methoden, um Stoffe in den Blutkreislauf zu befördern oder herauszufiltern, derzeit recht eingeschränkt sind.

In der kommenden Phase werden Verbesserungen in diesem Bereich größtenteils aus der Biochemie kommen, in Form von Wirkstoffen und Ergänzungsmitteln, die eine übermäßige Kalorienaufnahme verhindern und Stoffwechselabläufe für optimale Gesundheit reprogrammieren. Forschungen von Dr. Ron Kahn (Joslin Diabetes Center) sind bereits auf das Fett-Insulin-Rezeptorgen (FIR) gestoßen, welches die Anhäufung von Fett in Fettzellen regelt. Dr. Kahn konnte zeigen, dass die Blockierung der Expression dieses Gens in Fettzellen von Mäusen dazu führt, dass die Tiere im Übermaß fressen können und trotzdem schlank und gesund bleiben. Obwohl sie deutlich mehr fraßen als die Kontrollmäuse, lebten die Mäuse mit „FIR-Knockout“ um 18 Prozent länger und hatten eine deutlich geringere Rate an Herzerkrankungen und Diabetes. Pharmafirmen sind natürlich eifrig bestrebt, diese Ergebnisse auf den Menschen zu übertragen.

In einer Übergangsphase werden intelligente Nanobots im Verdauungstrakt und im Blutkreislauf exakt die benötigten Nährstoffe extrahieren, zusätzliche Nährstoffe und Ergänzungsmittel über unser persönliches Drahtlosnetz anfordern, und die übrige Materie zur Eliminierung freigeben.

Wer das für Zukunftsmusik hält, sei daran erinnert, dass intelligente Maschinen bereits auf dem Weg in unseren Blutkreislauf sind. In Dutzenden Projekten wird an Blutkreislauf-BioMEMS für diagnostische und therapeutische Zwecke gearbeitet.⁴ Wie bereits erwähnt, gibt es mehrere große Konferenzen zu diesem Thema.⁵ Es werden BioMEMS-Apparate entwickelt, um Krankheitserreger intelligent zu lokalisieren und gezielt medizinische Wirkstoffe freizusetzen.

Bei Tieren bereits testweise eingesetzt wurden beispielsweise nanogefertigte Geräte, die sich im Blut befinden und Hormone wie Insulin abgeben.⁶ Vergleichbare Systeme könnten gezielt Dopamin im Gehirn von Parkinsonpatienten freisetzen, das Blut von Bluterkranken mit Gerinnungsfaktoren ausstatten, und Wirkstoffe in Krebstumore befördern. Einer der Entwürfe sieht bis zu zwanzig Wirkstoffkammern vor, die ihren Inhalt an programmierten Zeitpunkten und Orten im Körper freigeben.⁷

Kensall Wise, Professor für Elektrotechnik (University of Michigan), hat winzige Neuro-Messapparate entwickelt, die eine genaue Überwachung der

elektrischen Aktivität bei Patienten mit neurologischen Erkrankungen ermöglichen.⁸ Zukünftige Entwicklungen sollen auch in der Lage sein, Wirkstoffe gezielt freizusetzen. Kazushi Ishiyama (Tohoku University in Japan) hat Mikromaschinen entwickelt, die mit winzigen Drehantrieben Wirkstoffe in Krebstumore transportieren.⁹

Eine besonders innovative Mikromaschine der Sandia National Laboratories hat Mikrozähne und einen Kiefer, der sich öffnen und schließen und auf diese Weise einzelne Zellen einfangen kann, um ihnen Substanzen wie DNS, Proteine oder Wirkstoffe zu implantieren.¹⁰ Viele Ansätze für Mikro- und Nanomaschinen für Körper und Blutkreislauf befinden sich in Entwicklung.

Letzten Endes werden wir in der Lage sein, für jeden Menschen die gesundheitlich optimale individuelle Nährstoffzusammensetzung (einschließlich der Hunderten von Sekundärmetaboliten) festzulegen. Diese Nährstoffkombinationen werden frei und günstig verfügbar sein – dann müssen wir uns überhaupt nicht mehr mit der Extraktion von Nährstoffen aus gewöhnlichen Nahrungsmitteln befassen.

Spezielle Stoffwechsel-Nanobots werden die Nährstoffe direkt ins Blut befördern; Sensoren in Blut und Körper werden über drahtlose Kommunikation dynamische Informationen über den aktuellen Nährstoffbedarf liefern. Diese Technik dürfte bis Ende der 2020er einigermaßen ausgereift sein.

Eine entscheidende Frage bei der Konzeption solcher Systeme lautet: Wie werden Nanobots in den Körper und wieder heraus gelangen? Die heutigen Techniken, beispielsweise intravenöse Katheter, lassen viel zu wünschen übrig. Anders als Wirkstoffe und Nahrungsergänzungsmittel sind Nanobots ein Stück weit intelligent. Sie merken, wenn ihr Inventar erschöpft ist, und können den Körper je nach Bedarf betreten und verlassen. Ein Szenario wäre ein spezielles im Gürtel oder Unterhemd integriertes Ernährungsgerät, das Nanobots enthält, die Nährstoffe transportieren, und durch die Haut oder über andere Körperöffnungen in den Körper gelangen.

Auf diesem technischen Entwicklungsstand könnten wir essen was wir wollen, allein um des Genusses und der gastronomischen Erfüllung wegen. Wir können die Geschmacksrichtungen, Texturen und Aromen der

kulinarischen Welt erkunden und dabei immer einen optimalen Nährstoffspiegel im Blut haben. Ein Weg dahin wäre ein modifizierter Verdauungstrakt, der überhaupt keine Aufnahme von Nährstoffen aus der Verdauung zulässt. Doch dies wäre immer noch eine Belastung für unseren Magen-Darm-Trakt – besser wäre es, sich von der konventionellen Verdauung völlig zu verabschieden und beispielsweise das Gegessene durch Nanobots eliminieren zu lassen, die wie winzige Abfallzerkleinerer wirken. So wie Ernährungs-Nanobots in den Körper eindringen, bewegen sich die Entsorger-Nanobots in die Gegenrichtung. Mit einer solchen Innovation wären wir auch nicht mehr auf blutreinigende Organe wie die Nieren angewiesen.

Letztendlich werden wir uns auch nicht mehr mit Spezialkleidung oder anderen expliziten Nahrungsmittelquellen abgeben müssen. So wie Berechnung allgegenwärtig sein wird, wird auch die Grundversorgung mit Stoffwechsel-Nanobots überall in unserer Umgebung integriert sein. Andererseits werden wir auch *innerhalb unseres Körpers* üppige Reserven aller nötigen Ressourcen mitführen. Unsere Körper der Version 1.0 tun dies nur in sehr beschränktem Maße: Sauerstoff für wenige Minuten, Kalorien (in Form von Glykogen) für ein paar Tage. Version 2.0 wird über sehr viel größere Reserven verfügen und somit über viel größere Zeiträume auf externe Ressourcen verzichten können.

Natürlich werden die meisten sich nicht sofort von ihrer guten alten Verdauung trennen, sobald diese Systeme eingeführt werden. Die Menschen haben auch nicht umgehend ihre Schreibmaschinen entsorgt, als der erste Computer mit Textverarbeitung auf den Markt kam. Früher oder später werden sich diese Techniken jedoch durchsetzen. Die wenigsten Menschen benutzen heute noch Schreibmaschinen, Pferdekutschen, Holzöfen oder andere überholte Techniken (außer als Experiment der historischen Selbsterfahrung). Genauso wird es mit unseren technisch überarbeiteten Körpern laufen. Sobald wir die Komplikationen, die sich mir einem umgestalteten Magen-Darm-System anfänglich unweigerlich ergeben, beseitigt haben, werden wir mehr und mehr zu solchen Verdauungssystemen übergehen. Ein graduell eingeführtes Nanobot-

basiertes Verdauungssystem wird den Verdauungstrakt zunächst nur unterstützen, bis es ihn schließlich ganz ersetzt.

Programmierbares Blut. Ein zentrales System unseres Körpers, für dessen Neuauflage es bereit umfassende, auf Reverse Engineering basierende Konzepte gibt, ist unser Blut. Ich habe schon zuvor auf Rob Freitas Entwürfe für nanotechnischen Ersatz von roten und weißen Blutkörperchen und Blutplättchen verwiesen.¹¹ Wie die meisten unserer biologischen Systeme erfüllen rote Blutzellen ihre Funktion – den Transport von Sauerstoff – nur sehr ineffizient, daher hat Freitas einen Ersatz mit maximaler Leistung konzipiert. Freitas' Respirozyten (künstliche rote Blutkörperchen) werden es möglich machen, Stunden ohne Sauerstoff auszukommen¹² – daher dürfen wir gespannt sein, wie damit in sportlichen Wettkämpfen umgegangen wird. Vermutlich werden Respirozyten und ähnliche Systeme bei der Olympiade und anderen Wettkämpfen verboten sein, doch dann haben wir das Problem, dass Teenager (deren Blut in der Regel um Respirozyten ergänzt sein wird) regelmäßig die Spitzenleistungen von Olympioniken überbieten. Die ersten Prototypen werden zwar noch ein bis zwei Jahrzehnte auf sich warten lassen, doch die physikalischen und chemischen Voraussetzungen sind bereits sehr genau ausgearbeitet. Analysen zeigen, dass Freitas' System Hunderte oder Tausende Male mehr Sauerstoff speichern und transportieren kann als natürliches Blut.

Freitas denkt auch an mikrometerkleine künstliche Blutplättchen, welche eine bis zu tausend Mal schnellere Hämostase (Blutgerinnung) ermöglichen¹³, sowie an nanotechnische „Mikrobivoren“ (künstliche weiße Blutkörperchen), welche Software herunterladen, um – Hunderte Male schneller als Antibiotika – spezifische Infektionen zu bekämpfen, und ungehindert von Wirkstoffresistenzen gegen jegliche Art von Bakterien, Viren oder Pilzen wirken können.¹⁴

Mit Herz – oder ohne. Das nächste Organ auf unserer Verbesserungsliste ist das Herz – eine ausgeklügelte, eindrucksvolle Maschine, jedoch mit einigen schweren Makeln. Das Herz kann aus unzähligen Gründen aufhören zu schlagen und ist grundsätzlich eine Schwachstelle unseres Körpers – es

fällt oft frühzeitig, und in der Regel lange vor den übrigen Körpersystemen, aus.

Zwar bieten künstliche Herzen allmählich einen brauchbaren Ersatz, doch effektiver wäre es, ganz auf das Herz zu verzichten. In Freitas' Arbeiten finden sich auch Pläne für künstliche Blutzellen, die sich selbstständig bewegen können. Wenn sich das Blut von alleine bewegt, besteht kein Bedarf mehr für eine zentrale Pumpe. Indem wir unsere Methoden, um Nanobots in den Blutkreislauf und wieder heraus zu befördern, perfektionieren, werden wir auch in der Lage sein, diese Nanobots kontinuierlich zu ersetzen. Des Weiteren hat Freitas Pläne für ein komplexes System mit fünfhundert Billionen Nanobots veröffentlicht, welches das gesamte menschliche Kreislaufsystem durch flüssigkeitslosen Transport von Nährstoffen und Zellen ersetzt.¹⁵

Energie wird der Körper aus mikroskopischen Brennstoffzellen beziehen, die entweder Wasserstoff oder den körpereigenen Brennstoff ATP benutzen. Wie im letzten Kapitel beschrieben, gibt es große Fortschritte mit Brennstoffzellen im Mikro- und Nanoformat, die mitunter auf körpereigene Glucose und ATP zugreifen können.¹⁶

Dank der drastisch verbesserten Sauerstoffversorgung durch Respirozyten werden wir auf die Lunge verzichten und nur durch Nanobots Sauerstoff beziehen und Kohlenstoffdioxid entsorgen können. Wie bei anderen Systemen wird es zunächst eine Übergangsphase geben, in der die neue Technik zunächst zur Unterstützung unserer natürlichen Systeme dient. Früher oder später wird es jedoch keinen Grund mehr geben, auf natürliche Weise zu atmen und auf ständige Luftzufuhr angewiesen zu sein. Sollten wir das Atmen an sich genießen, so können wir auch auf virtuellem Wege zu dieser Sinneserfahrung kommen.

Wenn die Zeit reif ist, werden wir auch nicht mehr auf die diversen Organe angewiesen sein, die Chemikalien, Hormone und Enzyme für unser Blut und andere Stoffwechselprozesse bereitstellen. Wir können schon heute biologisch gleichwertige Versionen vieler dieser Substanzen synthetisieren, und in ein bis zwei Jahrzehnten wird die Erzeugung der allermeisten biochemisch relevanten Stoffe ein Routineverfahren sein. Schon heute bauen wir künstliche Hormon-Organen. Das Lawrence

Livermore National Laboratory und Medtronic MiniMed (Kalifornien) entwickeln beispielsweise künstliche Bauchspeicheldrüsen zur Implantation unter der Haut. Diese werden den Blutzuckerspiegel überwachen, genau dosierte Insulinmengen freisetzen und durch ein Computerprogramm die Funktion von biologischen Inselzellen nachahmen.¹⁷

Im menschlichen Körper 2.0 werden Hormone und ähnliche Stoffe (insofern wir sie noch brauchen) durch Nanobots bereitgestellt, gesteuert durch intelligente Biofeedback-Systeme, die dafür sorgen, dass der richtige Spiegel gehalten wird. Da die meisten unserer biologischen Organe wegfallen, werden viele dieser Substanzen gar nicht mehr nötig sein und durch Ressourcen des Nanorobotik-Systems ersetzt werden.

Was bleibt übrig? Was sind wir also in den frühen 2030ern? Eliminiert haben wir: Herz, Lunge, rote und weiße Blutkörperchen, Blutplättchen, Bauchspeicheldrüse, die Schilddrüse und andere Hormonproduzenten, Nieren, Blase, Leber, die untere Speiseröhre, Magen, Dünndarm, Dickdarm und sonstige Därme. Übrig bleiben zunächst: Knochenskelett, Haut, Geschlechtsorgane, Sinnesorgane, Mund, obere Speiseröhre und Gehirn.

Das Skelett ist eine robuste Struktur, die wir bereits relativ gut verstehen. Wir sind bereits in der Lage, Teile davon zu ersetzen (Beispiel künstliches Hüftgelenk), allerdings sind diese Techniken noch stark eingeschränkt und erfordern schmerzhaft Operationen. Durch sich verkettende Nanobots werden wir eines Tages auch unser Skelett in einem nicht-invasiven, graduellen Prozess ersetzen können. Das menschliche Skelett 2.0 wird sehr robust sein und sich selbst reparieren.

Die Abwesenheit der meisten Organe, zum Beispiel der Leber und der Bauchspeicheldrüse, werden wir gar nicht spüren, da wir ihre Aktivität nicht bewusst wahrnehmen. Doch könnte es gut sein, dass wir die Haut, welche auch unsere primären und sekundären Geschlechtsorgane mit einschließt, behalten wollen, oder zumindest ihre Funktionen in Sachen Kommunikation und Sinnlichkeit. Doch auch die Haut werden wir verbessern können, durch neue, geschmeidige Nanomaterialien, die größeren Schutz vor physischen Einflüssen und extremen Temperaturen bieten und dabei die sinnliche Wahrnehmung verbessern. Dasselbe gilt für

Mund und obere Speiseröhre, die verbleibenden Teile des Verdauungssystems, die wir weiterhin benutzen wollen, um den Akt des Essens erfahren zu können.

Neugestaltung des menschlichen Gehirns. Wie schon besprochen werden Reverse Engineering und Neugestaltung auch vor dem wichtigsten System unseres Körpers, dem Gehirn, nicht haltmachen. Wir verfügen bereits über auf „neuromorpher“ Modellierung (Reverse Engineering von Gehirn und Nervensystem) basierende Implantate für eine wachsende Anzahl von Gehirnregionen.¹⁸ Forscher am MIT und in Harvard entwickeln Neuroimplantate um beschädigte Netzhäute zu ersetzen.¹⁹ Für Parkinsonpatienten gibt es Implantate, die direkt mit dem Nucleus ventralis posterior und dem Subthalamus kommunizieren, um die schlimmsten Symptome der Krankheit zu unterdrücken.²⁰ Ein Implantat für Menschen mit infantiler Zerebralparese und Multipler Sklerose, das mit dem ventralen lateralen Thalamus kommuniziert, kann effektiv das Zittern der Patienten unterdrücken.²¹ Rick Trosch, ein an der Pionierphase dieser Projekte beteiligter Arzt: „Anstatt das Gehirn wie eine Suppe zu behandeln und ihm Chemikalien zuzuführen, die bestimmte Neurotransmitter verstärken oder unterdrücken, behandeln wir es nun wie ein Schaltungssystem.“

Eine Vielzahl von Techniken wurde entwickelt um die Brücke zu schlagen zwischen digitaler Elektronik und der durchnässten, analogen biologischen Informationsverarbeitung. Forscher des Max-Planck-Instituts haben ein nicht-invasives Gerät entwickelt, das bidirektional mit Neuronen kommuniziert.²² Sie demonstrierten ihren „Neuronentransistor“, indem sie die Bewegungen einer Schnecke per Computer steuerten. Durch ähnliche Techniken gelang es auch, die Neuronen einer Schnecke neu zu verdrahten, sodass sie einfache logische und arithmetische Aufgaben erfüllten.

Forscher experimentieren auch mit „Quantenpunkten“: kleine Chips mit fotoleitfähigen (unter Lichteinstrahlung leitenden) Halbleiterkristallen, die mit Peptiden bestückt werden können, welche an spezifische Positionen auf der Oberfläche von Nervenzellen binden. Die Idee dahinter ist, Neuronen gezielt durch Licht bestimmter Wellenlänge zu aktivieren und somit auf externe Elektroden zu verzichten.²³

Man darf auch hoffen, dass sich durch solche Entwicklungen defekte Neuronenverbindungen bei Menschen mit Nervenschäden und Wirbelsäulenverletzungen wiederherstellen lassen. Lange glaubte man, dass sich Nervenbahnen nur kurz nach einer Verletzung reparieren lassen, da sich ungenutzte Nerven mit der Zeit zurückbilden. Eine neue Entdeckung hat jedoch gezeigt, dass neuroprothetische Systeme auch für Menschen mit lange bestehenden Wirbelsäulenverletzungen infrage kommen. Forscher der University of Utah forderten querschnittsgelähmte Patienten auf, ihre Glieder in unterschiedlicher Weise zu bewegen, und beobachteten dabei die Gehirnaktivität der Gelähmten per Magnetresonanztomografie (MRT). Obwohl die Nervenverbindungen zu den Gliedern seit Jahren unterbrochen waren, entsprachen die Aktivierungsmuster im Gehirn sehr genau denen von nicht gelähmten Menschen.²⁴

Es wird möglich sein, Sensoren im Gehirn von Gelähmten zu platzieren und so zu programmieren, dass sie anhand der neuronalen Aktivität motorische Befehle erkennen und die entsprechende Sequenz von Muskelbewegungen auslösen. Es gibt auch bereits Pläne für „nanoelektromechanische Systeme“ (NEMS), die sich ausdehnen und kontrahieren können, um nicht mehr funktionierende Muskeln zu ersetzen. Angesteuert würden sie entweder durch natürliche oder durch künstliche Nerven.

Wir werden Cyborgs. Der menschliche Körper 2.0 ist die Fortsetzung einer lang anhaltenden Entwicklung hin zu einer immer stärkeren Verbindung von Mensch und Technik. Computer begannen als riesige Maschinen in klimatisierten Räumen, in denen sich vorwiegend Techniker in weißen Laborkitteln herumtrieben. Von dort sind sie zunächst auf unseren Schreibtisch, dann auf unseren Schoß, und nun in unsere Hosentaschen vorgedrungen. Bald werden wir sie ganz selbstverständlich in unsere Körper und Gehirne einbauen. In den 2030ern werden wir aus überwiegend nichtbiologischen Teilen bestehen. Wie in **Kapitel 3** besprochen wird in den 2040ern nichtbiologische Intelligenz milliardenfach größer sein als biologische.

Die bestechende Aussicht, schwere Krankheiten und Behinderungen heilen zu können, wird dafür sorgen, dass die besprochenen Techniken schnell vorangetrieben werden. Doch medizinische Anwendungen bilden nur die Spitze des Eisbergs. Sobald diese Techniken etabliert sind, wird uns nichts davon abhalten, sie zu benutzen, um das menschliche Potenzial zu vervielfachen.

Stephen Hawking sagte vor Kurzem dem *Focus*, die Intelligenz von Computern werde die menschliche innerhalb der nächsten Jahrzehnte übersteigen. Er äußerte die Meinung, dass wir „dringend direkte Verbindungen mit dem Gehirn entwickeln müssen, damit Computer die menschliche Intelligenz erweitern können, anstatt ihr gegenüberzustehen“.²⁵ Hawking kann beruhigt sein: Die von ihm empfohlenen Entwicklungen sind in vollem Gange.

Der menschliche Körper 2.0 wird in vielen Variationen daherkommen, und jedes Organ und Körpersystem wird einen eigenen technischen Entwicklungsweg durchlaufen. Biologische Entwicklung ist nur zu „lokaler Optimierung“ fähig, das heißt, sie kann ihre Baupläne nur im Rahmen bereits viel früher in der Entwicklung getroffener „Entscheidungen“ verbessern. Beispielsweise kann die biologische Evolution ausschließlich Organismen hervorbringen, die aus einer ganz bestimmten Art von Bausteinen besteht, nämlich aus Proteinen, die aus eindimensionalen Aminosäureketten gefaltet sind. Die biologische Evolution ist beschränkt auf Denkprozesse (Mustererkennung, logische Analyse, Lernen und andere kognitive Fähigkeiten), die auf extrem langsamen chemischen Schaltungen beruhen. Und auch die biologische Evolution selbst ist langsam und verbessert nur in kleinen Schritten ihre Baupläne, die auf diesen immer gleichen Grundprinzipien beruhen. Es ist ihr nicht möglich abrupte Veränderungen vorzunehmen und beispielsweise zu diamantartigen Baumaterialien oder logischen Schaltungen aus Nanoröhren zu wechseln.

Der menschliche Körper 3.0. In den 2030ern und 2040ern rechne ich mit einer noch fundamentaleren Neustrukturierung: dem menschlichen Körper 3.0. Anstatt jedes einzelne Teilsystem zu überarbeiten, werden wir (das heißt der biologische und nichtbiologische Anteil unseres Denkens

gemeinsam) die Möglichkeit haben, unsere Körper auf Grundlage der Erfahrung mit Version 2.0 umzugestalten. Der Übergang von 2.0 zu 3.0 wird ebenso wie der Übergang von 1.0 zu 2.0 schrittweise vonstattengehen und viele konkurrierende Ideen involvieren.

Ein Merkmal der Version 3.0, wie ich sie mir vorstelle, besteht darin, dass wir unseren Körper wechseln können. Das wird insbesondere in virtuellen Umgebungen sehr einfach möglich sein, doch wir werden auch die Mittel haben, es in der physischen realen Wirklichkeit zu tun. Indem wir molekulare Nanofertigung auf uns selbst anwenden, werden wir unsere physische Manifestation schnell je nach Wunsch verändern können.

Auch wenn unsere Gehirne längst überwiegend nichtbiologisch sind, wird der menschliche Körper wahrscheinlich seine Ästhetik und emotionale Bedeutung behalten – angesichts des Einflusses dieser Ästhetik auf das menschliche Gehirn. (Auch die nichtbiologischen Erweiterungen unserer Gehirne werden ihre Wurzeln in der biologischen Intelligenz haben). Das heißt, auch der menschliche Körper 3.0 wird vermutlich noch menschlich (nach heutigen Maßstäben) aussehen. Der Begriff von Schönheit wird jedoch, aufgrund der großen Plastizität, die unsere Körper dann haben werden, mit der Zeit stark gedehnt werden. Schon heute modifizieren Menschen ihren Körper durch Piercings, Tattoos und Schönheitschirurgie – Veränderungen, die schnell zunehmend gesellschaftliche Akzeptanz finden. In Zukunft wird noch viel mehr experimentiert werden, da es möglich sein wird, körperliche Veränderungen jederzeit rückgängig zu machen.

J. Storrs Hall führte den Begriff der „Foglets“ ein: Nanobots, die verschiedene Strukturen formen können, indem sie sich ineinander verhaken, und die ihre Anordnung schnell verändern können. Der Name „Foglet“ (zu deutsch etwa: „Nebelteilchen“) kommt daher, dass eine ausreichend dichte Ansammlung dieser Nanobots Schall und Licht steuern und somit veränderliche Klänge und Bilder erzeugen könnte. Sie schaffen praktisch eine externe virtuelle Realität in der physischen Welt (im Gegensatz zu einer internen, die im Nervensystem entsteht). Mithilfe von Foglets kann ein Mensch seinen Körper und seine Umgebung verändern, wobei einige der Veränderungen nur Illusionen mithilfe von Licht und

Schall sind.²⁶ Halls Foglets sind eine Konzeptidee für reale Körper, die so veränderlich sind wie virtuelle.

BILL (EIN UMWELTSCHÜTZER): *Aber gießt man nicht das Kind mit dem Bade aus, mit dieser Körper-2.0-Geschichte? Wenn wir den kompletten Körper und das Gehirn durch Maschinen ersetzen, bleibt doch gar kein Mensch mehr übrig!*

RAY: *Da hast du eine andere Auffassung des Begriffs „Mensch“ als ich. Aber wo willst du die Grenze ziehen? Biologische und nichtbiologische Eingriffe zur Verbesserung des menschlichen Körpers sind ja nichts Neues – und viele Menschen leiden noch.*

BILL: *Ich habe nichts dagegen, menschliches Leiden zu lindern. Aber wenn man den ganzen Körper durch eine leistungsfähigere Maschine ersetzt, dann hat man eben auch nur noch eine Maschine. Autos sind auch schneller als wir, aber wir betrachten sie deswegen nicht als Menschen.*

RAY: *Ich denke das Problem ist das Wort „Maschine“. In deiner Vorstellung ist eine Maschine weniger wertvoll – nicht so komplex, kreativ, intelligent, vernünftig und feinsinnig – wie ein Mensch. Heute ist das richtig, denn auf alle Maschinen, die wir bisher zu Gesicht bekommen haben, Autos zum Beispiel, trifft das absolut zu. Aber der Knackpunkt meiner ganzen These von der Singularität ist, dass der Maschinenbegriff – und der Begriff von nichtbiologischer Intelligenz – grundlegend verändert wird.*

BILL: *Genau das ist mein Problem. Unsere Einschränkungen sind ein Teil von dem, was uns zu Menschen macht. Wir behaupten ja nicht, die Schnellsten zu sein und das beste Gedächtnis zu haben. Aber wir zeichnen uns durch eine undefinierbare, spirituelle Qualität aus, die Maschinen inhärent nicht besitzen.*

RAY: *Nochmals die Frage: Wo zieht man die Grenze? Menschen ersetzen schon heute Teile ihres Körpers und ihres Gehirns durch nichtbiologische Ersatzstücke, welche ihre „menschlichen“ Funktionen besser erfüllen.*

BILL: „Besser“ in dem Sinne, dass sie kranke oder beschädigte Organe und Systeme ersetzen. Aber du willst praktisch unsere gesamte Menschlichkeit austauschen, um unsere Leitungsfähigkeit zu steigern – und das ist dann inhärent nicht menschlich.

RAY: Vielleicht haben wir unterschiedliche Meinungen, was es bedeutet, Mensch zu sein. Für mich sind es nicht die Beschränkungen, die den Menschen ausmachen – obwohl er viele hat –, sondern seine Fähigkeit, über sich selbst hinauszuwachsen. Wir sind nicht auf dem Boden geblieben. Wir sind nicht einmal auf der Erde geblieben. Und wir werden uns nicht mit den Grenzen abfinden, die die Natur uns gesteckt hat.

BILL: Aber wir müssen sehr vorsichtig sein mit unseren technischen Möglichkeiten. Ab einem gewissen Punkt geht eine gewisse unbeschreibbare Qualität verloren, die unserem Leben Sinn gibt.

RAY: Ich schätze, wir können uns darauf einigen, dass wir uns darüber klar werden müssen, wo die wichtigen Wesenszüge der Menschlichkeit liegen. Aber es gibt keinen Grund an unseren Beschränkungen festzuhalten.

...für das menschliche Gehirn

Ist alles, was wir sind und scheinen, nur ein Traum in einem Traum?

EDGAR ALLAN POE

Der Computerprogrammierer ist der Schöpfer von Welten, deren alleiniger Gesetzgeber er ist. Kein Dramatiker, kein Bühnenregisseur, kein Kaiser, so mächtig er auch ist, übte je eine so absolute Autorität aus bei der Gestaltung einer Bühne oder eines Schlachtfelds und bei der Befehligung von Schauspielern oder Soldaten von derart unerschütterlichem Gehorsam.

JOSEPH WEIZENBAUM

Eines Tages betrachteten zwei Mönche eine im Wind flatternde Fahne. Der erste sagte: „Die Fahne bewegt sich, nicht der Wind.“ Der zweite entgegnete: „Nicht die Fahne bewegt sich, sondern der Wind.“ Ein dritter Mönch kam vorbei und sagte: „Weder die Fahne noch der Wind bewegen sich. Euer Geist bewegt sich.“

ZEN-PARABEL

Angenommen es sagt jemand: „Denke dir diesen Schmetterling genau so wie er ist, aber hässlich anstatt schön.“

LUDWIG WITTGENSTEIN

Das 2010-Szenario. Die Computer werden zu Beginn des nächsten Jahrzehnts weitgehend unsichtbar sein: eingearbeitet in unsere Kleidung, eingebettet in unsere Möbel und Umwelt. Sie werden Teil eines weltumspannenden, engmaschigen Netzes aus Berechnungsressourcen sein. (Die Rede ist vom Internet der Zukunft, in dem alle verbundenen Geräte zu Servern werden und sich zu Supercomputern und Speicherverbänden zusammenschließen). Wir werden ständig über eine Breitband-Funk-Verbindung mit dem Internet in Kontakt stehen. Displays werden in Brillen und Kontaktlinsen integriert und Bilder direkt auf die Netzhaut projiziert werden. Das US-amerikanische Department of Defense setzt bereits Techniken dieser Art ein, um Soldaten in virtuellen Umgebungen auszubilden.²⁷ Das Institute for Creative Technologies der US-Army stellt ein System zur Schaffung einer umfassenden virtuellen Realität vor, das virtuelle Menschen enthält, die realistisch auf die Handlungen des Benutzers reagieren.

Entsprechend werden winzige Geräte künstliche Klangumgebungen schaffen. Schon jetzt werden erste Mobiltelefone eingeführt, die als Teil der Kleidung den Ton auf die Ohren projizieren.²⁸ Und es gibt einen MP3-Player, der Musik durch Schädelvibrationen überträgt, sodass niemand anders sie hören kann.²⁹ Auch die Army hat Helme entwickelt, die den Ton über den Schädel des Soldaten übertragen.

Es gibt auch Systeme, die Schall über Entfernungen exklusiv auf Einzelpersonen übertragen können – eine Technik, die in dem Film *Minority Report* in Form von personalisierter, sprechender Straßenwerbung dramatisiert wurde. Die „Hypersonic Sound“-Technik und das „Audio Spotlight“-System erreichen diesen Effekt durch Modulierung von Klang auf zielgenauen Ultraschallstrahlen. Der eigentliche Klang entsteht dann im Zielbereich durch Interaktion des Ultraschalls mit der Luft. Durch Ausrichtung mehrerer solcher Strahlen auf eine Wand ist zudem eine neue Art von personalisiertem Surround-Sound möglich.³⁰

Diese Techniken können zu jedem Zeitpunkt eine hochauflösende und vollständige visuelle und auditorische virtuelle Realität schaffen. Wir werden zudem in einer erweiterten Realität leben, mit über die reale Welt gelegten Displays, die uns in Echtzeit Hinweise und Erklärungen liefern. Unser Netzhautdisplay könnte uns beispielsweise erinnern: „Das ist Dr. Soundso vom ABC-Institut, den Sie vor sechs Monaten auf der XYZ-Konferenz getroffen haben“, oder „Das ist das Time-Life-Gebäude, ihr Meeting ist im zehnten Stockwerk.“

Wir werden Echtzeit-Übersetzungen für fremde Sprachen haben, gewissermaßen Untertitel zur Wirklichkeit, und Zugang zu vielen Arten von Onlineinformationen während unseres Alltags. Virtuelle, über die reale Welt gelegte Personen werden uns mit Informationen versorgen und uns bei unseren Arbeiten und Transaktionen behilflich sein. Diese virtuellen Assistenten werden nicht nur auf Fragen und Anweisungen warten, sondern uns selbstständig zur Hand gehen, wenn sie sehen, dass wir eine bestimmte Information benötigen. Wenn wir uns beispielsweise fragen: „Diese eine Schauspielerin... die die Prinzessin gespielt hat, oder die Königin... in dem einen Film mit dem Roboter...“; dann wird uns unser virtueller Assistent ins Ohr flüstern (oder in unser Blickfeld schreiben): „Natalie Portman als Königin Amidala in *Star Wars*, Episode 1, 2 und 3.“

Das 2030-Szenario. Nanotechnik wird eine voll umfassende und absolut überzeugende virtuelle Realität schaffen. Nanobots werden sich in direkter Nähe zu allen von unseren Sinnen kommenden Neuronenbindungen positionieren. Wir haben bereits die Technik für Elektronik, die ohne direkte Berührung bidirektional mit Neuronen kommuniziert. Forscher des Max-Planck-Instituts haben beispielsweise einen „Neuronentransistor“ entwickelt, der sowohl die Aktivität eines in der Nähe befindlichen Neurons erkennen, als auch ein Feuern des Neurons auslösen oder unterbinden kann – Kommunikation in beide Richtungen.³¹ Wie zuvor erwähnt, können Quantenpunkte nicht-invasive Kommunikation zwischen Neuronen und Elektronik ermöglichen.³²

Wollen wir die unveränderte, reale Wirklichkeit erfahren, so bleiben die Nanobots einfach, wo sie sind (in den Kapillaren), und machen gar nichts.

Wollen wir uns in die virtuelle Realität begeben, so unterdrücken sie alle echten Sinneswahrnehmungen und überschreiben sie mit Signalen der virtuellen Umgebung.³³ Unser Gehirn interpretiert diese Signale, als kämen sie von unserem physischen Körper, denn letztendlich hat das Gehirn keine direkte Körperwahrnehmung. Die Signale des Körpers – einige Hundert Megabit pro Sekunde mit Informationen über Berührungen, Temperatur, Säurepegel, Darmtätigkeit und so weiter – durchlaufen, wie in **Kapitel 4** beschrieben, zunächst die Neuronen der Lamina-1-Schicht, dann den hinteren ventromedialen Nukleus und erreichen schließlich die Inselrinden. Wenn wir solche Signale korrekt kodieren – und dank Reverse Engineering werden wir dies zu tun wissen –, so kann das Gehirn keinen Unterschied zwischen künstlichen und echten Wahrnehmungssignalen feststellen. Wenn wir nun wie gewohnt unseren Muskeln und Gliedern befehlen, sich zu bewegen, fangen Nanobots wiederum die Signale ab, verhindern, dass sich unser echter Körper bewegt, veranlassen stattdessen Bewegungen unseres virtuellen Körpers, und passen unser vestibuläres System und unsere Ausrichtung und Position in der virtuellen Realität entsprechend an.

Im Netz wird es eine Vielzahl an virtuellen Umgebungen zu erkunden geben – sowohl Kopien realer Orte als auch Fantasiewelten ohne reale Entsprechung; auch unmögliche Welten, in denen die Gesetze der Physik nicht gelten. In virtuellen Welten werden wir in jeder erdenklichen Weise mit anderen realen oder simulierten Menschen (die sich letztlich natürlich nicht mehr unterscheiden werden) interagieren können – von Geschäftstreffen bis hin zu sinnlichen Begegnungen. „Designer für virtuelle Welten“ wird eine neue Berufsbezeichnung und Kunstform werden.

Jemand anderes werden. In virtuellen Welten werden wir uns nicht mit einer einzigen Persönlichkeit begnügen müssen, da wir die Möglichkeit haben werden, unser Erscheinungsbild zu ändern und uns praktisch in andere Personen zu verwandeln. Ohne unseren physischen Körper (in der realen Wirklichkeit) zu verändern, werden wir unseren projizierten Körper in den dreidimensionalen virtuellen Welten im Handumdrehen verwandeln können. Dabei werden wir uns verschiedenen Leuten gleichzeitig mit verschiedenen Körpern präsentieren können. Unsere Eltern können uns

beispielsweise als eine Person sehen und unsere Freundin gleichzeitig als eine andere. Andere Personen können unsere Körperwahl überschreiben und uns wiederum mit einem anderen Körper sehen als dem, den wir selbst ausgewählt haben. Wir können verschiedene Körperprojektionen für verschiedene Menschen auswählen, beispielsweise unseren klugen Onkel zu Benjamin Franklin machen und einen nervigen Mitarbeiter zu einem Clown. Paare können gemeinsam aussuchen, wer sie sind, und sogar ihre Körper tauschen. All diese Entscheidungen sind problemlos umsetzbar.

Bei einer Demonstration von virtueller Realität bei der TED-Konferenz in Monterey im Jahre 2001 hatte ich die Gelegenheit zu erfahren, wie es sich anfühlt, mich in eine Rolle zu projizieren. Magnetsensoren an meiner Kleidung erfassten meine Bewegungen und ein Computer erzeugte in einer superschnellen Animation ein nahezu fotorealistisches Bild einer jungen Frau – Ramona – die meine Bewegungen in Echtzeit vollführte. Mittels Signalverarbeitungstechnik wurde meine Stimme in eine Frauenstimme verwandelt und steuerte zudem Ramonas Lippenbewegungen. So erschien es dem TED-Publikum, als würde Ramona selbst den Vortrag halten.³⁴

Um das Prinzip klarzumachen, bekam das Publikum Ramona und mich gleichzeitig zu sehen, wie wir uns simultan und exakt gleich bewegten. Eine Band kam auf die Bühne und ich – das heißt, Ramona – gab „White Rabbit“ von Jefferson Airplane zum Besten, sowie ein selbst geschriebenes Lied. Ich bekam auch noch Unterstützung von meiner damals vierzehnjährigen, ebenfalls mit Sensoren ausgestatteten Tochter, deren Bewegungen auf einen männlichen Hintergrundtänzer übertragen wurden. Dieser Tänzer war niemand anders als – ein virtueller – Richard Saul Wurman (der Impresario der TED-Konferenz). Auf diesem Wege kam Wurman zu seinem Debüt in Sachen Hip-Hop-Tanz, das den Höhepunkt der Präsentation bildete. Unter dem Publikum befand sich die kreative Führung von Warner Bros., die daraufhin den Film *Simone* drehte, in welcher Al Pacino die Rolle eines Mannes spielt, der sich in ganz ähnlicher Weise in Simone verwandelt.

Dies war eine wichtige und bewegende Erfahrung für mich. Wenn ich in den „Cyberspiegel“ (ein Display, das mir zeigte, was das Publikum sah) blickte, sah ich mich nicht als die Person, die mir üblicherweise aus dem Spiegel entgegenblickt, sondern als Ramona. So durfte ich am eigenen

Leibe – anstatt nur in theoretischen Überlegungen – erfahren, wie es sich anfühlt, sich in eine andere Person zu verwandeln.

Menschen identifizieren sich oft stark mit ihrem Körper („Ich habe eine große Nase“, „Ich bin schlank“, „Ich bin groß und stark“ und so weiter). Ich empfand die Möglichkeit, eine andere Person sein zu können, als befreiend. Wir alle verfügen über eine Reihe verschiedener Persönlichkeiten, doch wir unterdrücken sie in der Regel, weil wir oft keine Möglichkeit haben, sie auszuleben. Wir haben auch heute ein geringes Maß an Techniken – Kleidung, Schminke, Frisur –, um uns für verschiedene Begegnungen und Anlässe zu verändern, doch mit den virtuellen Umgebungen der Zukunft wird sich unsere Persönlichkeitspalette drastisch erweitern.

Diese künstlichen Umgebungen können nicht nur all unsere Sinne bedienen, sondern auch unsere Gefühle beeinflussen. Durch Nanobots wird es möglich sein, die neuronalen Mechanismen für Emotionen, sexuelles Vergnügen und andere Derivate unserer Sinneswahrnehmungen und geistigen Reaktionen gezielt auszulösen. Experimente während Operationen am offenen Gehirn haben gezeigt, dass die Stimulation bestimmter Punkte im Gehirn emotionale Erfahrungen auslösen kann. (Beispiel: das in *The Age of Spiritual Machines* beschriebene Mädchen, das plötzlich alles unheimlich lustig fand, sobald ein bestimmter Punkt ihres Gehirns stimuliert wurde).³⁵ Einige Emotionen und sekundäre Reaktionen können nicht durch Stimulation eines einzelnen Neurons, sondern nur durch ein breiteres Aktivitätsmuster ausgelöst werden, doch mit massenhaft verteilten Nanobots können auch solche Muster problemlos stimuliert werden.

Experience Beamer. „Experience Beamer“³⁶ werden ihren kompletten Wahrnehmungsfluss sowie die neuronale Darstellung ihrer emotionalen Reaktionen ins Netz stellen – so ähnlich wie die Leute, die heute eine Webcam im Schlafzimmer haben. Es wird ein beliebter Zeitvertreib sein, sich in den sensorisch-emotionalen Erfahrungsfluss anderer Personen einzuklinken, ungefähr wie in dem Film *Being John Malkovich*. Alternativ wird man aus einer breiten Palette aufgezeichneter Erfahrungen auswählen können; das Entwerfen künstlicher Erfahrungen wird eine neue Kunstform werden.

Geistiges Wachstum. Die wichtigste Funktion der Nanobots um 2030 wird darin bestehen, unseren Geist buchstäblich zu erweitern, indem sie biologische und nichtbiologische Intelligenz verknüpfen. Zunächst werden unsere hundert Milliarden extrem langsamen Neuronenverbindungen um schnelle virtuelle Verbindungen durch Nanobot-Kommunikation ergänzt werden.³⁶ Dadurch werden wir unsere Mustererkennungsfähigkeiten, unser Gedächtnis und unsere allgemeine Denkleistung drastisch verbessern können. Außerdem wird mit dieser Technik direkte, drahtlose Kommunikation von Gehirn zu Gehirn möglich.

Man kann nicht oft genug betonen, dass sich unser Denken gegen Ende der ersten Hälfte des einundzwanzigsten Jahrhunderts auf überwiegend nichtbiologische Substrate verlagern wird. Wie in **Kapitel 3** erläutert, ist biologisches Denken auf 10^{16} cps^{**} beschränkt (unter Annahme einer neuromorphen Modellierung) – die Gehirne aller Menschen kommen auf insgesamt 10^{26} cps. An diesen Zahlen wird sich, trotz biotechnischer Anpassung unseres Genoms, nicht viel ändern. Die Rechenkapazität nichtbiologischer Intelligenz wächst hingegen exponentiell (mit wachsender Wachstumsrate) und wird die Kapazität biologischer Intelligenz Mitte der 2040er weit übersteigen.

Zu diesem Zeitpunkt werden wir schon über das Paradigma des mit Nanobots bestückten biologischen Gehirns hinaus sein. Nichtbiologische Intelligenz wird milliardenfach leistungsstärker und somit vorherrschend sein. Wir werden Körper der Version 3.0 haben, die wir nach Belieben verändern und austauschen können. Schon im zweiten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts werden wir in umfassenden audiovisuellen virtuellen Umgebungen im Handumdrehen unseren Körper wechseln können; in den 2020ern wird dies in virtuellen Umgebungen, die alle Sinne umfassen, möglich sein; und in den 2040ern schließlich in der realen Wirklichkeit.

Nichtbiologische Intelligenz sollte ebenfalls als menschlich angesehen werden, da sie ein Produkt der Mensch-Maschinen-Zivilisation ist und zumindest teilweise auf dem Reverse Engineering unserer biologischen Intelligenz basiert. Auf diesen wichtigen philosophischen Aspekt werde ich im nächsten Kapitel näher eingehen. Bei der Verschmelzung biologischer und nichtbiologischer Intelligenz treffen nicht nur unterschiedliche Medien,

sondern auch verschiedene Methoden und Organisationen des Denkens aufeinander. Dadurch wird es uns möglich sein unseren Geist – im wahren Sinne des Wortes – in jeder erdenklichen Weise zu erweitern.

Der Aufbau unseres Gehirns ist relativ starr festgelegt. Zwar wird das Gehirn durch die natürlichen Lernprozesse immer wieder um neue Muster von Neuronenverbindungen und Neurotransmitterverteilungen erweitert, doch der Gesamtkapazität des Gehirns sind klare Grenzen gesetzt. Wenn Ende der 2030er der nichtbiologische Anteil unseres Denkens überhandnimmt, werden wir nicht mehr an den ursprünglichen Gehirnaufbau gebunden sein. Neuroimplantate auf Basis massenhaft im Gehirn verteilter Nanobots werden unser Gedächtnis, unsere Mustererkennung und all unsere sensorischen und kognitiven Fähigkeiten drastisch erweitern. Da die Nanobots untereinander in Verbindung stehen werden, können sie beliebig neuronale Verbindungen herstellen, bestehende Verbindungen unterbrechen (indem sie die Aktivität von Neuronen unterdrücken), neue Hybridnetze (aus biologischen und nichtbiologischen Komponenten) knüpfen und neue komplett nichtbiologische Netze sowie andere Arten nichtbiologischer Intelligenz in das Gehirn einbinden.

Der Einsatz von Nanobots zur Erweiterung des Gehirns wird ein bedeutender Fortschritt sein gegenüber chirurgisch installierten Neuroimplantaten, die derzeit gerade eingeführt werden. Nanobots werden ganz ohne Eingriff über das Blut in den Körper gelangen und können jederzeit wieder zurückgeholt werden, der Prozess lässt sich also problemlos rückgängig machen. Sie sind frei programmierbar und können in einem Augenblick eine virtuelle Realität erzeugen und im nächsten diverse Gehirnerweiterungen bereitstellen. Ihre Software und Konfiguration ist veränderlich. Vor allen Dingen sind sie breit verstreut über Milliarden von Positionen im Gehirn, während sich ein chirurgisch platziertes Implantat an einer (oder einigen wenigen) unveränderlichen Position(en) befindet.

MOLLY 2004: *Diese virtuelle Realität klingt nicht gerade einladend. Ich meine, mit diesen ganzen Nanobots, die einem im Kopf herumkrabbeln – wie kleine Käfer.*

RAY: *Aber du wirst nicht mehr davon merken als von den Nervenzellen in deinem Gehirn oder den Bakterien in deinem Magen.*

MOLLY 2004: *Ok, das klingt nicht so schlimm. Aber ich kann auch jetzt schon unter Einbeziehung aller Sinne anderen Menschen begegnen – indem ich sie einfach in der realen Welt treffe!*

SIGMUND FREUD: *Als ich jung war und es gerade die ersten Telefone gab, hieß es auch: „Wozu will ich denn mit jemandem sprechen, der Kilometer weit entfernt ist, wenn wir uns auch einfach treffen können?“*

RAY: *Genau, das Telefon ist nichts anderes als eine auditorische virtuelle Realität – oder andersherum: Umfassende virtuelle Realität ist im Prinzip ein Ganzkörpertelefon. Man kann sich darüber mit jedem jederzeit treffen – und mehr tun, als nur reden.*

GEORGE 2048: *Definitiv ein Segen für Prostituierte, sie mussten für ihre Dienstleistungen gar nicht mehr aus dem Haus gehen. Klare juristische Abgrenzungen waren nicht mehr möglich und 2033 blieb dem Staat nichts anderes übrig, als virtuelle Prostitution zu legalisieren.*

MOLLY 2004: *Sehr interessant, aber ich weiß nicht, ob ich das gut finde.*

GEORGE 2048: *Okay, aber stell dir vor, du könntest deinen Lieblingsfilmstar treffen.*

MOLLY 2004: *Das tue ich bereits regelmäßig in meiner Fantasie.*

RAY: *Fantasie ist schön und gut, aber es ist nicht das Gleiche, wie etwas real – beziehungsweise virtuell – zu erleben.*

MOLLY 2004: *Okay, aber was ist, wenn mein Filmstar anderes zu tun hat?*

RAY: *Das ist ein anderer Vorzug der virtuellen Realität um 2029: Du kannst dich mit Millionen von künstlichen Personen treffen.*

MOLLY 2104: *Ihr kommt aus dem Jahr 2004, das verstehe ich – aber wir haben diese Terminologie mit den „Gesetzen für nichtbiologische Personen“ im Jahr 2052 abgeschafft. Ich meine, wir sind sehr viel realer, als... ähm... ich will jetzt nichts Falsches sagen...*

MOLLY 2004: *Das will ich hoffen.*

MOLLY 2104: *Sagen wir's so: Man muss nicht aus explizit biologischen Strukturen bestehen um...*

GEORGE 2048: *...leidenschaftlich zu sein?*

MOLLY 2104: *Du solltest darüber eigentlich Bescheid wissen.*

TIMOTHY LEARY: *Was, wenn man einen schlechten Trip hat?*

RAY: *Du meinst, wenn bei der virtuellen Erfahrung etwas schief läuft?*
Timothy: *Genau.*

RAY: *Nun, du kannst sie jederzeit abbrechen – so wie du ein Telefon auflegst.*

MOLLY 2004: *Vorausgesetzt, du hast noch Kontrolle über die Software.*

RAY: *Klar, das muss auf jeden Fall sichergestellt werden.*

SIGMUND: *Ich sehe hier großes Potenzial für die Psychotherapie.*

RAY: *Ja, in der virtuellen Welt kann man sein wie und wer man will.*

SIGMUND: *Eine Möglichkeit, unterdrückte Triebe auszuleben...*

RAY: *Und nicht nur mit der verlangten Person, man kann auch selbst zu dieser Person werden.*

SIGMUND: *Ganz genau. Wir erschaffen ohnehin die Objekte unserer Begierde in unserem Unterbewusstsein. Man stelle sich nur vor, Paare könnten ihre Geschlechter verändern und der eine könnte sich in den anderen verwandeln.*

MOLLY 2004: *Als vorübergehende Therapiemaßnahme, nehme ich an?*

SIGMUND: *Selbstverständlich. Ich würde hierzu nur unter meiner persönlichen Überwachung raten.*

MOLLY 2004: *Natürlich.*

MOLLY 2104: *Hey George, weißt du noch, wie wir uns in alle Figuren aus sämtlichen Romanen von Allen Kurzweil gleichzeitig verwandelt haben?³⁷ Du warst alle Frauen, und ich alle Männer?*

GEORGE 2048: *Klar! Ich fand dich am besten als französischen Erfinder aus dem achtzehnten Jahrhundert, der erotische Taschenuhren baut.*

MOLLY 2004: *Okay, erklär mir das noch mal mit dem virtuellen Sex. Wie läuft das genau ab?*

RAY: Mit deinem virtuellen Körper, der simuliert wird. Nanobots in und um dein Nervensystem erzeugen die entsprechenden Sinnessignale: visuell, auditorisch, taktil und natürlich olfaktorisch. Deinem Gehirn erscheint das ganze real, weil die Signale dieselben sind, die von realen Erfahrungen erzeugt würden. Die virtuelle Realität gehorcht in der Regel den Gesetzen der Physik, wobei das natürlich von der gewählten Umgebung abhängt. Begibst du dich dorthin gemeinsam mit anderen Personen, so haben diese anderen Intelligenzen – ob sie ihren Sitz in einem biologischen Körper haben oder nicht – ebenfalls Körper in der virtuellen Umgebung. Dein virtueller Körper muss nicht deinem realen Körper entsprechen. Der Körper, den du wählst, kann auch ein anderer sein, als der, den dein Partner für dich auswählt. Die Computer, welche die virtuelle Umgebung, die virtuellen Körper und die entsprechenden Nervensignale erzeugen, sorgen dafür, dass deine Handlungen auf die virtuelle Erfahrung des anderen übertragen werden, und andersherum.

MOLLY 2004: Also hätte ich sexuelles Vergnügen, obwohl ich gar nicht wirklich... du weißt schon... mit jemandem zusammen bin?

RAY: Du wärst ja schon mit jemandem zusammen, nur nicht in der physikalischen Welt – und natürlich könnte es sein, dass dieser jemand auch gar nicht physikalisch existiert. Sexuelles Vergnügen ist kein direkter Sinneseindruck, sondern eher mit einer Emotion vergleichbar. Es ist eine Empfindung, die das Gehirn selbst erzeugt, und unser Denken und Handeln beeinflusst – ganz wie Humor oder Wut.

MOLLY 2004: Wie dieses Mädchen? Das alles zum Totlachen fand, wenn die Chirurgen einen bestimmten Punkt in ihrem Gehirn stimulierten?

RAY: Ganz genau. Für all unsere Wahrnehmungen, Empfindungen und Emotionen gibt es neuronale Korrelationen. Manche kann man punktgenau festmachen, andere sind das Ergebnis eines Aktivierungsmusters. So oder so wird es uns möglich sein, unsere emotionalen Reaktionen als Teil unserer virtuellen Erfahrungen zu verändern und zu erweitern.

MOLLY 2004: Das wäre eigentlich ganz praktisch, dann würde ich bei meinen Dates mit Männern den „lustig“-Schalter hochdrehen. Oder

den „absurd“-Schalter, der ist auch manchmal gut, je nachdem.

NED LUDD: *Ich glaube das ufert aus. Die Menschen würden ihre Zeit nur noch in der virtuellen Realität verbringen.*

MOLLY 2004: *Ach, das macht mein zehnjähriger Neffe schon heute mit seinen Computerspielen.*

RAY: *Die sind aber noch nicht voll umfassend.*

MOLLY 2004: *Das stimmt. Wir sehen ihn, aber ich bin mir nicht sicher, ob er uns wahrnimmt. Wenn die Spiele mal voll umfassend sind, ist er dann wohl ganz weg.*

GEORGE 2048: *Ich verstehe eure Sorgen, angesichts der flachen virtuellen Welten von 2004, aber mit denen von 2048 werdet ihr keine Probleme mehr haben. Sie sind um ein Vielfaches ansprechender als die reale Welt.*

MOLLY 2004: *Woher willst du das wissen, wenn du die reale Welt gar nicht kennst?*

GEORGE 2048: *Ich habe so manches darüber gehört, und außerdem können wir sie simulieren.*

MOLLY 2104: *Und ich kann einen realen Körper haben, wann immer ich will, gar kein Thema. Ich muss sagen, ich finde es sehr befreiend, nicht an einen bestimmten Körper gebunden zu sein, geschweige denn an einen biologischen. Kannst du dir das vorstellen, so gebunden zu sein, mit unzähligen Schranken und Bürden?*

MOLLY 2004: *Ja, ich denke ich weiß, wovon du redest.*

...für die Lebenserwartung

Es ist äußerst bemerkenswert, dass sich in der gesamten Biologie kein Hinweis auf die Notwendigkeit des Todes findet. Wenn wir ein Perpetuum mobile bauen wollen, so haben wir bei der Untersuchung der Physik genügend Gesetze entdeckt, um zu erkennen, dass unser Vorhaben entweder unmöglich ist, oder die Gesetze falsch sind. Doch die Biologie hat noch nichts gefunden, das auf die Unausweichlichkeit des Todes hinweist. Für mich deutet das darauf hin, dass er gar nicht unausweichlich ist, und dass es nur eine Frage der Zeit ist, bis Biologen herausfinden, was die Ursachen dieser Unannehmlichkeit sind, und diese schreckliche allgemeine Krankheit oder Vergänglichkeit des menschlichen Körpers geheilt wird.

RICHARD FEYNMAN

Gib niemals auf, gib niemals, niemals, niemals, niemals, niemals auf – weder in großen noch in kleinen Dingen – gib niemals auf.

WINSTON CHURCHILL

Zuerst die Unsterblichkeit! Alles andere kann warten.

CORWYN PRATER

Unfreiwilliger Tod ist eine der tragenden Säule der Evolution – aber das heißt nicht, dass er etwas Gutes ist.

MICHAEL ANISSIMOV

Stellen Sie sich vor, Sie wären ein Forscher vor 200 Jahren, und Sie hätten herausgefunden, dass mehr Hygiene die Kindersterblichkeit drastisch reduzieren kann. Sie tun das in einem Vortrag kund, und in den hinteren Reihen steht jemand auf und sagt: „Mit Verlaub, wenn wir das machen, kommt es zu einer Bevölkerungsexplosion!“ Würden sie nun antworten, „Nein, alles wird gut, weil wir alle beim Sex diese absurden Gummidinger benutzen“, so würde sie niemand ernst nehmen. Und doch ist genau das eingetreten – Empfängnisverhütung hat sich [etwa zeitgleich mit einer Abnahme der Kindersterblichkeit] durchgesetzt.

AUBREY DE GREY, GERONTOLOGE

Sterben ist unsere Pflicht.

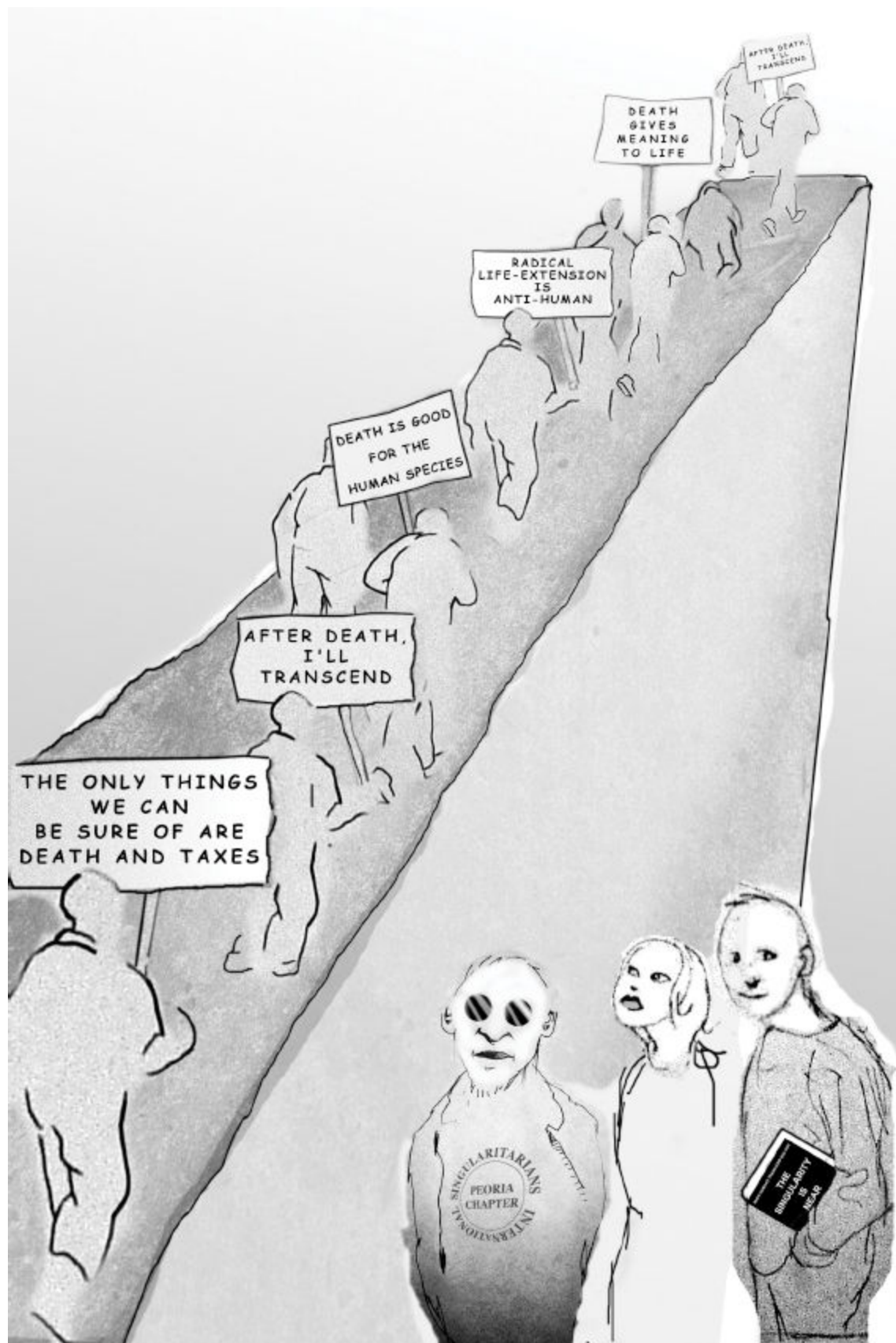
DICK LAMM, FRÜHERER GOUVERNEUR VON COLORADO

Manche von uns finden das ziemlich schade.

BERTRAND RUSSELL, 1955, BEZÜGLICH DER TATSACHE, DASS STATISTISCH TÄGLICH ETWA
EINHUNDERT MENSCHEN ALTERSBEDINGT STERBEN³⁸

Evolution, der Prozess, der die Menschheit hervorbrachte, verfolgt nur ein Ziel: genetische Maschinen von maximaler Fähigkeit sich selbst zu kopieren, zu erzeugen. Rückblickend ist das der einzige Weg, auf dem in einem unintelligenten Universum komplexe Strukturen wie das Leben entstehen können. Doch dieses Ziel gerät oft mit menschlichen Interessen in Konflikt, verursacht Tod, Leiden und kurze Lebensspannen. Der schnelle Fortschritt der Menschheit ist eine Geschichte des Durchbrechens evolutionär bedingter Einschränkungen.

MICHAEL ANISSIMOV



Die meisten Leser dieses Buches werden die Singularität wahrscheinlich miterleben. Wie im vorigen Kapitel besprochen werden die Fortschritte der Biotechnik uns erlauben, unsere Gene und Stoffwechselprozesse zu reprogrammieren, um Krankheiten und Alterung zu unterbinden. Diese Fortschritte lassen sich gliedern in: Genetik (Beeinflussung der Gene), Proteomik (Erforschung und Beeinflussung der Rolle von Proteinen), Gentherapie (Unterdrückung von Genexpression, beispielsweise durch RNS-Interferenz, sowie Implantation neuer Gene in den Zellkern), Wirkstoffentwicklung (gezielte Konzeption von Wirkstoffen, die eine ganz bestimmte Veränderung in Krankheits- und Alterungsprozessen bewirken) und therapeutisches Klonen (Erzeugung verjüngter Versionen körpereigener Zellen, Gewebe und Organe, mit verlängerten Telomeren, korrigierter DNS und dergleichen).

Biotechnik wird die Natur erweitern und ihre offenkundigen Mängel korrigieren. Die (mit der biotechnischen überlappende) nanotechnische Revolution wird uns die Möglichkeit geben, uns weit über die engen Beschränkungen der Biologie hinwegzusetzen. Wie Terry Grossman und ich in *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever* beschrieben haben, werden wir schnell an das Wissen und an die Werkzeuge kommen, um das „Haus“, in dem wir wohnen, unser Körper und unser Gehirn, auf unbegrenzte Zeit zu reparieren und zu erweitern. Leider ist den wenigsten Menschen meiner Generation bewusst, dass sie, anders als frühere Generationen, nicht mehr an den „normalen“ Lebenszyklus gebunden sind – dass sie nicht leiden und sterben müssen, *sofern* sie drastische Maßnahmen ergreifen, die über den gewöhnlichen Begriff eines gesunden Lebensstils hinausgehen (siehe „Zusätzliche Informationen und Kontakt“ auf [Seite 507](#)).

Bisher bestand die einzige Möglichkeit für einen Menschen, über seine biologisch befristete Lebenszeit hinaus weiterzuleben, darin, seine Werte, Überzeugungen und sein Wissen an die nachfolgenden Generationen weiterzugeben. Doch die Weise, in der wir die Muster erhalten, die unsere Existenz ausmachen, wird bald einem Paradigmenwechsel unterzogen werden. Die menschliche Lebenserwartung ist kontinuierlich gestiegen und ihr Anstieg wird sich jetzt, da wir in die Phase des Reverse Engineerings

der Informationsprozesse, auf denen Leben und Krankheit beruhen, eintreten, noch deutlich beschleunigen. Wenn wir eine bestimmte Auswahl medizinisch vermeidbarer Gesundheitsprobleme, welche 50 Prozent der Gesamtheit dieser Probleme umfasst, eliminieren würden, so stiege die menschliche Lebenserwartung nach Robert Freitas' Einschätzung auf 150 Jahre an; durch Beseitigung von 90 Prozent der Gesundheitsprobleme auf über fünfhundert Jahre und mit 99 Prozent auf über tausend.³⁹ Es steht zu erwarten, dass eine volle Entfaltung der Bio- und Nanotechnik praktisch alle natürlichen Todesursachen beseitigen wird. Indem wir zu einer nichtbiologischen Existenzform übergehen, erhalten wir die Möglichkeit uns selbst zu „backupen“ (Sicherheitskopien jener Muster zu erstellen, welche unser Wissen, unsere Fähigkeiten und unsere Persönlichkeit ausmachen), und somit die meisten uns bekannten Todesursachen auszuschließen.

Lebenserwartung (in Jahren)⁴⁰

Cro-Magnon-Ära	18
Altes Ägypten	25
Europa um 1400	30
Europa und USA um 1800	37
USA um 1900	48
USA 2002	78

Der Übergang zur nichtbiologischen Existenz

Ein Geist von gleichbleibender Kapazität kann nicht ewig leben; nach ein paar Tausend Jahren würde er eher einer sich wiederholenden Tonbandschleife gleichen als einer Person. Der Geist selbst muss wachsen, um ewig leben zu können, [...] und wenn er groß genug ist, blickt er zurück [...] inwiefern kann er sich mit der ursprünglichen Seele verbunden fühlen, die er einmal gewesen ist? Das spätere Wesen wäre alles, was das frühere war, aber noch vieles mehr.

VERNOR VINCE

Die Reiche der Zukunft sind Reiche des Geistes.

WINSTON CHURCHILL

In **Kapitel 4** habe ich über Gehirn-Uploads berichtet. Im einfachsten Szenario der Gehirnportierung werden in einem Gehirnsan (sehr wahrscheinlich von innen) *sämtliche* relevanten Details erfasst, und der Zustand des Gehirns in einem anderen (sehr wahrscheinlich leistungsstärkeren) Substrat reproduziert. Dieses Verfahren wird in Zukunft möglich sein – vermutlich ab Ende der 2030er Jahre. Das sehe ich jedoch nicht als primären Grund für den Übergang zur nichtbiologischen Existenz. Dieser Übergang wird, so wie andere Paradigmenwechsel, ein fließender sein (jedoch mit zunehmender Geschwindigkeit).

Wie zuvor besprochen wird der Übergang zum nichtbiologischen Denken eine erdrutschartige Entwicklung sein. Wir werden weiterhin menschliche Körper haben, doch sie werden veränderliche Projektionen unserer Intelligenz sein. Mit anderen Worten werden wir, sobald wir über molekulare Nanofertigung verfügen, unsere Körper je nach Wunsch erschaffen und umgestalten können.

Werden solch fundamentale Veränderungen, egal wie sie zustande kommen, uns ermöglichen ewig zu leben? Die Antwort hängt davon ab, was wir unter „Leben“ und „Sterben“ verstehen. Denken wir einmal an Computerdateien: Wir verlieren nicht all unsere Daten, wenn wir auf ein neueres ComputermodeLL umsteigen. Wir kopieren unsere Dateien und installieren sie wieder auf der neuen Hardware. Unsere Software führt ihre Existenz nicht unbedingt ewig fort, doch ihre Lebensdauer ist unabhängig von der Hardware, auf der sie läuft.

Wenn heute unsere menschliche Hardware – unser Körper – versagt, so stirbt unsere geistige Software mit ihm. Das wird jedoch nicht mehr der Fall sein, wenn wir die Möglichkeit haben, die Tausende Billionen von Bytes an Informationen abzuspeichern, die unser Gehirn ausmachen (einschließlich unseres restlichen Nervensystems, dem Hormonsystem und anderer Strukturen unserer geistigen Software).

Dann wird die Lebensdauer unserer geistigen Software nicht mehr vom durchgängigen Funktionieren eines bestimmten Hardwaremediums (sprich dem Überleben unseres biologischen Körpers und Gehirns) abhängig sein. Letzten Endes werden Software-Menschen weit über die engen Beschränkungen heutiger Menschen hinaus erweitert werden. Sie werden

im Netz leben und Körper projizieren, wann immer sie es müssen oder wollen: virtuelle Körper in unterschiedlichen virtuellen Umgebungen, holografische Körper, Foglet-Körper, sowie mit Nanobotschwärmen und anderen Formen von Nanotechnik bestückte physikalische Körper.

Gegen Mitte des einundzwanzigsten Jahrhunderts werden Menschen ihr Denken grenzenlos erweitern können. Dies ist eine Art von Unsterblichkeit, wobei gesagt werden muss, dass Daten und Informationen nicht unbedingt ewig Bestand haben: Die Lebensdauer von Informationen ist abhängig von ihrer Relevanz, Nützlichkeit und Zugänglichkeit. Wer je versucht hat, auf Informationen in einem veralteten, obskuren Format zuzugreifen (beispielsweise auf dem Magnetband eines Minicomputers von 1970), weiß um die Schwierigkeit bei der Erhaltung von Software. Wenn wir jedoch gewissenhaft mit unserer geistigen Software umgehen, regelmäßig Sicherungskopien erstellen und auf moderne Formate und Medien portieren, können wir eine Art Unsterblichkeit erreichen, zumindest als Software-Menschen. Später in diesem Jahrhundert wird es uns bemerkenswert erscheinen, dass es einmal Menschen gab, die ihr Leben lebten, ohne Backups ihrer allerwertvollsten Informationen – ihres Gehirns und Körpers –anzulegen.

Ist dies derselbe Begriff von Unsterblichkeit wie im Falle eines physischen Menschen – wie wir ihn heute kennen –, der ewig lebt? In einer gewissen Weise ja, denn auch der heutige Mensch ist keine unveränderliche Ansammlung von Materie. Forschungen haben gezeigt, dass selbst Neuronen, die als relativ dauerhaft gelten, ihre einzelnen Teilsysteme innerhalb weniger Wochen austauschen. Dauerhaft ist nur unser Muster in Materie und Energie – und auch dieses verändert sich allmählich mit der Zeit. Genauso wird das Muster eines Software-Menschen Bestand haben, sich entwickeln und langsam verändern.

Aber ist diese Person, die sich aus meiner geistigen Software ergibt, über viele Berechnungssubstrate migriert und jedes einzelne dieser Medien überlebt – ist diese Person wirklich ich? Dies bringt uns zu den Fragen nach Bewusstsein und Identität, über die seit Platons Dialogen debattiert wird (und auf welche ich im nächsten Kapitel eingehen werde). Diese Fragen – bislang Gegenstand des gesitteten philosophischen Diskurses – werden im

Laufe des ein- undzwanzigsten Jahrhunderts zu wesentlichen, praktischen, politischen und juristischen Themen werden.

Eine verwandte Frage lautet: Ist Tod wünschenswert? Die „Unausweichlichkeit“ des Todes ist tief im menschlichen Denken verwurzelt. Ist der Tod nicht vermeidbar, so bleibt uns nichts anderes übrig, ihn als notwendig, gar als etwas Nobles, zu rationalisieren. Die Technik der Singularität wird dem Menschen praktische und zugängliche Mittel beschere, sich zu etwas Größerem zu entwickeln – somit wird dem Tod keine primäre sinngebende Rolle für unser Leben mehr zukommen.

Die Lebensdauer von Informationen

„Den Schrecken dieses Momentes“, fuhr der König fort, „werde ich nie, niemals vergessen!“ „Wirst du doch“, sagte die Königin, „falls du keine Notiz darüber anlegst.“

LEWIS CARROLL, *THROUGH THE LOOKING-GLASS*

Nichts ist sicher, so sagt man, außer dem Tod und den Steuern – was den Tod betrifft, wäre ich mir da nicht so sicher.

JOSEPH STROUT, NEUROWISSENSCHAFTLER

Ich weiß es nicht, Herr. Aber als was sie sich auch immer entpuppen mögen, ich bin sicher, dass Ihr sie besteuern werdet.

MICHAEL FARADAY, AUF EINE FRAGE DES BRITISCHEN FISKUS, WELCHER PRAKTISCHE NUTZEN SICH AUS DER DEMONSTRATION DES ELEKTROMAGNETISMUS ZIEHEN LÄSST.

Gehe nicht sanftmütig in diese gute Nacht,... Wüte, wüte gegen das Sterben des Lichts.

DYLAN THOMAS

Die Möglichkeit, unser Leben, unsere Geschichte, unsere Gedanken und unsere Fähigkeiten in Informationen zu übersetzen, wirft die Frage auf, wie lange Informationen Bestand haben. Ich habe Wissen stets großen Wert beigemessen und als Kind Informationen aller Art gesammelt – eine Neigung, die ich von meinem Vater habe.

Mein Vater war einer dieser Menschen, die gerne Bilder und Tonaufnahmen sammeln, die ihr Leben dokumentieren. Nach seinem plötzlichen Tod im Alter von achtundfünfzig im Jahre 1970 erbte ich sein Archiv, das ich bis zum heutigen Tag aufbewahrt habe. Ich besitze die

Dissertation meines Vaters an der Universität Wien, welche seine einzigartigen Gedanken zu Brahms' Werken enthält. Ganze Alben von Zeitungsausschnitten über seine gefeierten Konzerte in Österreich. Wichtige Briefe seines amerikanischen Förderers, der seine Flucht vor Hitler finanzierte, kurz bevor die Reichskristallnacht und andere Entwicklungen in Europa ein Entkommen unmöglich machten. Kistenweise Erinnerungsstücke, Fotos, Musikaufnahmen auf Vinyl, Magnetbänder, persönliche Briefe und sogar alte Rechnungen.

Ebenso von meinem Vater geerbt habe ich die Neigung, Erinnerungen an mein eigenes Leben zu sammeln, weshalb sich zum Vermächtnis meines Vaters mehrere Hundert Kisten meiner eigenen Papiere und Akten gesellt haben. Die Produktivität meines Vaters, dem lediglich Schreibmaschine und Kohlepapier zu Verfügung standen, steht in keinem Verhältnis zu meiner eigenen, da ich auf Computer und Hochgeschwindigkeitsdrucker zurückgreifen kann, um meine Gedanken in allen möglichen Permutationen zu reproduzieren.

In meinen eigenen Kisten lagern auch verschiedene Formen digitaler Medien: Lochkarten, Lochstreifen, digitale Magnetbänder und Disketten in verschiedensten Größen und Formaten. Ich frage mich oft, inwieweit die darauf gespeicherten Informationen zugänglich bleiben. Die Zugänglichkeit der Informationen ist ironischerweise umgekehrt proportional zur Fortschrittlichkeit der Speichertechnik. Am einfachsten zu lesen sind die Papierdokumente, selbst wenn sie schon alt und vergilbt sind. Nur ein klein wenig schwieriger wird es mit Schallplatten und analogen Bandaufnahmen – hier sind technische Hilfsmittel erforderlich, die jedoch leicht aufzutreiben sind. Schwieriger wird es bei Lochkarten, doch auch dafür finden sich noch Lesegeräte, und das Speicherformat ist relativ unkompliziert.

Die bei Weitem am schwierigsten zugänglichen Daten befinden sich auf digitalen Disketten und Bändern: Für jedes dieser Medien muss ich das genaue Format und das passende Laufwerk ermitteln – handelt es sich um IBM 1620 von 1960 oder doch um Data General Nova I von 1973? Wenn ich die nötige Hardware beisammen habe, kommt die Softwareebene: ein passendes Betriebssystem, Laufwerktreiber und Anwendungsprogramme.

Und wer hilft mir mit den zahlreichen Problemen, die mir auf der Software- und Hardwareebene unweigerlich begegnen? Es ist schwer genug, einen neuen Computer zum Laufen zu kriegen – und hier ist die von Rede Geräten, für welche die Kundenbetreuung, falls es jemals eine gab, vor Jahrzehnten eingestellt wurde. Selbst die Ausstellungsstücke im Computer History Museum haben größtenteils schon vor vielen Jahren den Geist aufgegeben.⁴¹

Selbst wenn ich all diese Hürden meistern würde, müsste ich damit rechnen, dass die Disketten über die Jahre unleserlich geworden sind und die alten Computer hauptsächlich Fehlermeldungen ausspucken.⁴² Sind die Informationen also verloren? Nicht ganz. Selbst wenn die magnetischen Daten für die Originalhardware nicht mehr lesbar sind, könnten modernere, ausreichend empfindliche Lesegeräte die verblichenen Datensegmente immer noch reproduzieren – vergleichbar mit digitaler Bildverbesserung, die auf Scans von alten Büchern angewendet wird. Die Informationen sind also immer noch da, nur schwer zugänglich. Durch ausreichenden Aufwand und historische Recherchen sind sie wiederherstellbar. Hätten wir Grund zur Annahme, dass eine dieser Disketten geheime Daten von großem Wert enthält, so würden wir sicher Mittel und Wege finden, diese Daten auszulesen.

Allerdings wird wohl niemand aus reiner Nostalgie diese Mühe auf sich nehmen. Ich habe meinerseits weitgehend vorgesorgt und die meisten meiner alten Daten ausgedruckt. Doch Papierarchive sind auch nicht die Antwort auf alle Fragen, da sie andere Probleme mit sich bringen. Zwar kann ich selbst ein Jahrhunderte altes Manuskript lesen, das ich in meiner Hand halte, doch das Auffinden eines bestimmten Dokuments in tausenden unzulänglich sortierten Aktenordnern kann viel Zeit und Nerven kosten. Ganze Nachmittage kann man mit der Suche nach dem richtigen Ordner zubringen, ganz zu schweigen von der Gefahr, sich beim Umstapeln dutzender schwerer Kisten den Rücken zu ruinieren. Mikrofilm und Mikrofiche können das Ganze etwas erleichtern, doch die Schwierigkeit, das richtige Dokument zu finden, bleibt.

Mein Traum ist, diese Hunderte von Aufzeichnungen zu scannen und in einer riesigen persönlichen Datenbank zu archivieren, wodurch ich mit

modernen Suchmethoden auf sie zugreifen könnte. Ich habe auch schon einen Namen für dieses Unterfangen – DAISI* – und sammle seit vielen Jahren Ideen dafür. Der Computerpionier Gordon Bell (früherer leitender Entwickler der Digital Equipment Corporation), DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) und die Long Now Foundation arbeiten ebenfalls an solchen Systemen.⁴³

DAISI wird das langwierige Scannen und Katalogisieren zahlloser Dokumente automatisieren. Doch die wahre Herausforderung bei der Verwirklichung von DAISI ist eine andere: Durch welche Hard- und Software kann ich gewährleisten, dass mein Archiv auch Jahrzehnte später noch zugänglich ist?

Natürlich ist mein Privatarchiv nur ein mikroskopischer Ausschnitt der exponentiell wachsenden Wissensdatenbank der menschlichen Zivilisation. Es ist dieses kollektive Wissen unserer Spezies, das uns von anderen Tieren unterscheidet. Auch andere Tiere kommunizieren, doch sie häufen keinen wachsenden und sich entwickelnden Wissensschatz an, der von Generation zu Generation weitergegeben wird. Da wir dieses wertvolle Vermächtnis, wie es Bryan Bergeron (Experte für medizinische Informatik) formuliert, in „verschwindender Tinte“ schreiben, scheint das gesammelte Wissen unserer Zivilisation in großer Gefahr zu sein.⁴⁴ Diese Gefahr scheint gemeinsam mit unseren Wissensdatenbanken exponentiell zu wachsen. Das Problem wird noch verschlimmert durch die Zunahme der Geschwindigkeit, in der wir neue Hardware- und Softwarestandards einführen.

Ein weiteres Lager wertvoller Informationen ist in unserem Gehirn. Unsere Erinnerungen und Fertigkeiten sind – flüchtige – Informationen, die in unseren Neurotransmitterverteilungen, Neuronenbindungen und sonstigen Details unseres Nervensystems kodiert sind. Diese Informationen sind die wertvollsten überhaupt – einer der Gründe, weshalb der Tod eines Menschen so tragisch ist. Wie zuvor besprochen, wird es letztlich möglich sein, die Tausende Billionen von Bytes, die in unseren Gehirnen stecken, abzurufen, dauerhaft zu archivieren und zu verstehen.

Das Kopieren unseres kompletten Geistes auf andere Medien wirft eine Reihe philosophischer Fragen auf, die ich im nächsten Kapitel behandeln werde – beispielsweise: „Bin das wirklich ich oder ist das jemand anderes,

der über meine Gedanken und mein Wissen verfügt?“ Wie dem auch sei – durch Erfassung und Reproduktion sämtlicher Informationen und Informationsprozesse unseres Gehirns wäre es uns (oder zumindest einer Entität, die sich genau wie wir verhält) scheinbar möglich, „ewig zu leben“. Doch folgt das eine wirklich aus dem anderen?

Seit Urzeiten ist die Lebensdauer unserer geistigen Software unabänderlich an das Überleben unserer biologischen Hardware geknüpft. Die vollständige Kopierbarkeit unserer Informationsprozesse würde diese beiden Aspekte unserer Sterblichkeit voneinander loslösen. Doch wie wir gesehen haben, ist Software selbst nicht unbedingt von Dauer – zahlreiche Gründe sprechen sogar gegen eine lange Lebensspanne von Software.

Was können wir also über die Lebenserwartung von Software sagen (ob es sich nun um das sentimentale Archiv einer Einzelperson, das Gemeinschaftswissen der Mensch-Maschinen-Zivilisation oder die geistige Software unseres Gehirns handelt)? Die Antwort lautet schlicht: *Information besteht nur so lange, wie sie für irgendwen von Interesse ist.* Was mein DAISI-Projekt betrifft, bin ich zu dem Schluss gekommen, dass es keine Hardware- und Softwareformate gibt (und wohl auch nie geben wird), die mit ausreichender Sicherheit gewährleisten können, dass die gespeicherten Informationen auch Jahrzehnte später (mit vertretbarem Aufwand) zugänglich sind.⁴⁵ Die einzige Möglichkeit, mein Archiv (oder jede andere Informationsmenge) zu erhalten, besteht in regelmäßigen Upgrades und Portierungen auf die neueste Hard- und Software. Jedes vernachlässigte Datenarchiv wird früher oder später ebenso unzugänglich wie meine alten 8-Zoll-Disketten für PDP-8-Rechner.

Informationen können nur durch ständige Pflege „am Leben“ gehalten werden. Ob Daten oder Wissen – Informationen überleben nur, wenn wir dafür sorgen. Folglich können wir nur so lange leben, wie wir uns um uns selbst kümmern. Unser Wissen über Krankheiten und Altern ist bereits so weit fortgeschritten, dass der entscheidendste Faktor für unsere Lebensdauer unsere eigene *Lebenseinstellung* ist.

Der Wissensfundus unserer Zivilisation bleibt nicht von selbst erhalten. Wir müssen das kulturelle und technische Vermächtnis unserer Vorfahren immer wieder neu entdecken, interpretieren und formatieren. All diese

Informationen gehen verloren, wenn wir sie nicht aktiv erhalten. Unsere handschriftlich festgehaltenen Gedanken und Ideen in digitale Software zu übertragen gewährleistet keine Unsterblichkeit.

MOLLY 2004: *Ich bin also nur eine Datei?*

MOLLY 2104: *Naja, keine statische Datei, eine dynamische Datei! Und wieso „nur“? Was gibt es Wichtigeres als Dateien?*

MOLLY 2004: *Also ich lösche ständig Dateien, auch dynamische.*

MOLLY 2104: *Nicht alle Dateien sind gleicherschaffen.*

MOLLY 2004: *Das stimmt wohl. Ich war ganz schön am Boden, als ich die einzige Kopie meiner Abschlussarbeit verloren hatte. Sechs Monate Arbeit futsch und ich konnte von vorne anfangen.*

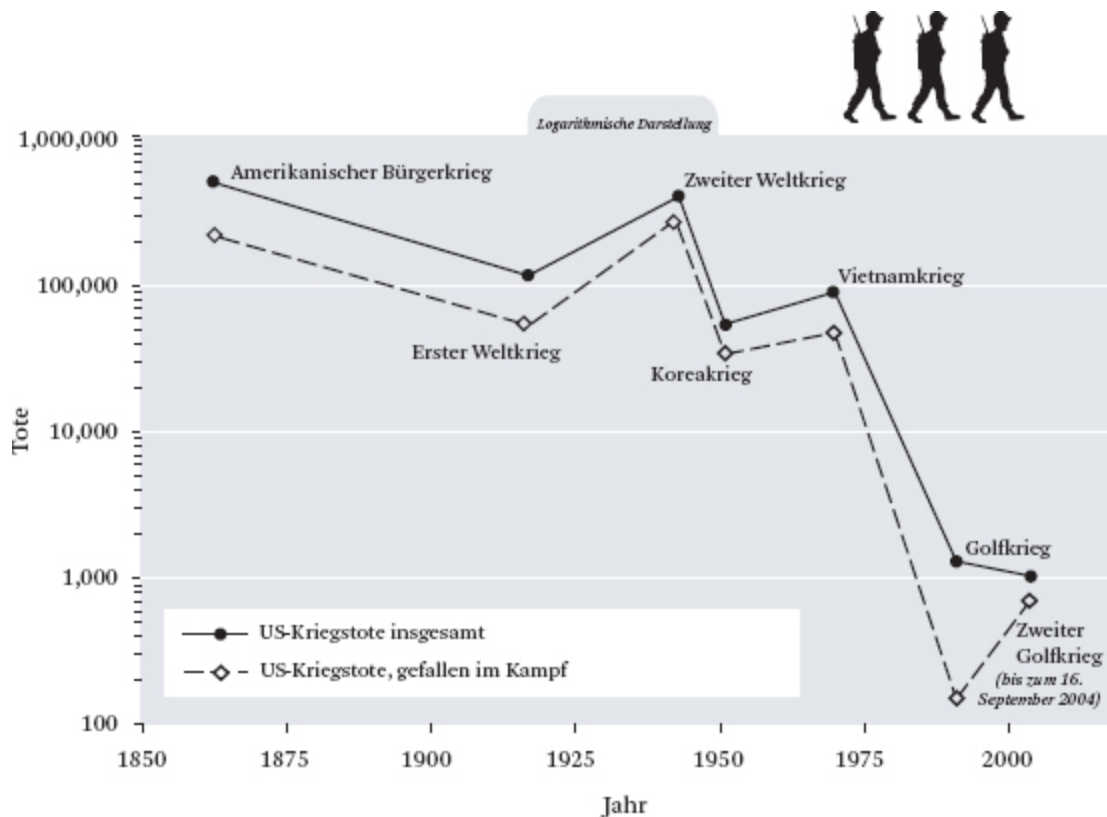
MOLLY 2104: *Ja, das war der Horror – ich erinnere mich noch ganz genau, obwohl es über hundert Jahre her ist. Es war, als hätte ich einen kleinen Teil von mir selbst verloren. Und nun überleg mal, wie wertvoll die Gesamtheit deiner – beziehungsweise meiner – Gedanken, Erfahrungen und Fähigkeiten ist!*

...für die Kriegsführung: Fernsteuerung, Robotik, Robustheit, Miniaturisierung und virtuelle Realität

Infolge intelligenterer Waffen gibt es einen starken Trend zu präzisen Missionen mit weniger Verlusten – auch wenn man durch die immer genauere und realistischere Fernsehberichterstattung einen anderen Eindruck bekommen kann. Von den großen Schlachten des Ersten und Zweiten Weltkriegs und dem Koreakrieg bekam man in den USA nur wenige, undeutliche Bilder zu sehen. Heute sitzen wir bei fast jedem Konflikt in der ersten Reihe. Jeder Krieg hat seine Tücken, doch die Anzahl der Verluste offenbaren eindeutig einen Übergang zu zielgenauer, intelligenter Kriegsführung. Wir sehen eine ähnliche Entwicklung wie in der Medizin, wo immer intelligentere Waffen gegen Krankheiten mit immer weniger Nebenwirkungen zum Einsatz kommen. Bei Kollateralschäden gibt

es einen vergleichbaren Rückgang wie bei den Eigenverlusten, auch wenn durch die heutige Berichterstattung ein anderer Eindruck entstehen kann. (Man bedenke die fünfzig Millionen zivilen Opfer des Zweiten Weltkriegs).

US-Kriegstote



Ich bin eines von fünf Mitgliedern der Army Science Advisory Group (ASAG), welche die US-Army bei der Auswahl von Forschungsprioritäten berät. Die Informationen, die wir erhalten, unsere Überlegungen und die Empfehlungen, die wir aussprechen, sind zwar vertraulich – ich kann jedoch die ungefähre Richtung beschreiben, die das US-Militär mit seinen technischen Entwicklungen einschlägt.

Dr. John A. Parmentola, Forschungsleiter der US-Army, beschreibt die „Neugestaltung“ des Department of Defense als einen Übergang zu Streitkräften, die „schnell einsetzbar, vernetzt, zu schnellen Entscheidungen fähig, auf allen Ebenen überlegen und in der Lage sind, in jedem

Kampfgebiet geballte Wirkung zu entfalten.“⁴⁶ Das in Entwicklung befindliche und für das zweite Jahrzehnt dieses Jahrhunderts angesetzte Future Combat System (FCS) beschreibt Parmentola als „kleiner, leichter, schneller, tödlicher und schlauer“.

Für die zukünftige Kriegsführung und -technik sind drastische Änderungen geplant. Zwar stehen die Details noch nicht ganz fest, doch die Army plant den Einsatz von Brigade Combat Teams (BCTs) mit etwa 2.500 Soldaten, unbemannten Robotersystemen und FCS-Ausrüstung. Ein einziges BCT würde etwa 3.300 „Plattformen“ umfassen, die jeweils über eigene intelligente Rechnersysteme verfügen. In einem BCT würden alle Einheiten über ein gemeinsames, einheitliches Bild des Kampfgebiets („common operating picture“, COP) verfügen, das jedem Soldaten die Informationen liefert, die er benötigt – unter anderem über Netzhautdisplays und, in der Zukunft, direkt über neuronale Verbindungen.

Die Army strebt an, BCTs mit einer Vorlaufzeit von 96 Stunden und komplette Divisionen innerhalb von 120 Stunden einsetzen zu können. Durch neue Materialien und Techniken wird das Ausrüstungsgewicht pro Soldat bei deutlich gesteigerter Effektivität von derzeit etwa fünfzig Kilogramm auf zwanzig Kilogramm sinken. Einen Teil des Gepäcks werden „Roboter-Mulis“ absetzen.

Als Material für Uniformen wurde eine neue Form von Kevlar aus in Polyethylenglycol gelösten Siliziumoxid-Nanopartikeln entwickelt. Das Material ist bei normaler Benutzung weich und geschmeidig, wird unter Belastung jedoch nahezu undurchdringlich und stichfest. Das Institute for Soldier Nanotechnologies der Army (Teil des MIT) entwickelt sogenannte „Exomuskulatur“: ein nanotechnisches Material, das die Körperkraft von Soldaten beim Hantieren von schwerem Gerät vergrößert.⁴⁷

Abrams-Panzer haben mit nur drei Verlusten in zwanzig Jahren Kampfeinsatz eine bemerkenswerte Überlebensquote. Dies ist sowohl der fortschrittlichen Panzerung als auch intelligenten Waffensystemen zum Abfangen feindlicher Raketen zu verdanken. Ein Abrams wiegt jedoch über siebzig Tonnen – um die FCS-Vorgaben zu erfüllen, muss dieses Gewicht deutlich reduziert werden. Neue, leichte und zugleich ultrastabile Nanomaterialien (beispielsweise Kombinationen aus Kunststoff und

Nanoröhren, die fünfzig Mal härter als Stahl sind) und verbesserte Computerintelligenz zum Abfangen von Raketenangriffen sollen das Gewicht von Bodenkampfsystemen drastisch vermindern.

Der Trend zu unbemannten Luftfahrzeugen („unmanned aerial vehicles“, UAVs), der mit der bewaffneten Predator-Drohne in Afghanistan und im Irak begann, wird sich beschleunigen. In der militärischen Forschung werden unter anderem Mikro-UAVs von der Größe eines Vogels entwickelt, die schnell und präzise sowohl für Aufklärung als auch im Kampf einsetzbar sind. Auch über noch kleinere UAVs in der Größe von Hummeln wird nachgedacht. Das Navigationsvermögen echter Hummeln, das auf einem komplexen Zusammenspiel des linken und rechten visuellen Systems beruht, konnte bereits nachgebaut werden und wird in diesen Minifluggeräten Anwendung finden.

Den Kern des FCS bildet ein selbstorganisierendes, verteiltes Kommunikationsnetz, das Informationen von jedem Soldaten und jedem Ausrüstungsstück empfängt und bedarfsgerechte Informationen und Daten an alle beteiligten Menschen und Maschinen liefert. Es wird keine verwundbaren Ziele in Form von zentralen Kommunikationsknoten geben. Informationen werden dynamisch um beschädigte Teile des Netzes herum geleitet. Von höchster Priorität ist dabei selbstverständlich, die Integrität der Kommunikation zu gewährleisten und ein Abhören und Manipulieren von Informationen durch feindliche Kräfte zu verhindern. Entsprechend werden elektronische Methoden und Mittel der Cyberkriegführung (zum Beispiel Computerviren) entwickelt werden, um die feindliche Kommunikation zu infiltrieren, zu unterbrechen und durcheinanderzubringen.

Das FCS ist kein einzelnes, abgestecktes Programm; es ist eine allgemeine Schwerpunktsetzung bei der Entwicklung militärischer Systeme und zielt auf ferngesteuerte, autonome, miniaturisierte und robotische Systeme mit selbstorganisierender, verteilter und sicherer Kommunikation.

Das Project Alpha der U.S. Joint Forces (das darauf zielt, Neuerungs Ideen schneller in die verschiedenen Waffengattungen zu tragen) sieht für 2025 eine „weitgehend robotische“ Streitmacht aus TACs* vor, die „ein gewisses Level an Autonomie haben – anpassbare Autonomie oder überwachte Autonomie oder volle Autonomie innerhalb eines [...]

Missionsrahmens.“⁴⁸ TACs wird es in unterschiedlichsten Größen geben, von Nano- und Mikrobots bis hin zu großen UAVs und anderen Fahrzeugen sowie automatischen Systemen, die sich in unwegsamem Gelände fortbewegen können. Ein innovatives, von der NASA zu militärischen Zwecken entwickeltes Konzept hat die Form einer Schlange.⁴⁹

Eines der Programme, die zur Entwicklung selbstorganisierender Schwärme kleiner Roboter (mit denen in den 2020ern zu rechnen ist) beitragen, ist das Autonomous Intelligent Network and Systems (AINS) Programm des Office of Naval Research, das eine Drohnenarmee aus unbemannten, autonomen Robotern zu Land, zu Wasser und in der Luft vorsieht. Die Schwärme werden von einem Menschen durch dezentrale Steuer- und Kontrollsysteme befehligt werden – ein „unbezwingbares Internet der Lüfte“, wie der Leiter des Projekts Allen Moshfegh es ausdrückt.⁵⁰

Auch an Schwarmintelligenz wird intensiv geforscht.⁵¹ Unter Schwarmintelligenz zu verstehen ist die Entstehung von komplexem Verhalten durch das Zusammenspiel einer großen Anzahl individueller Agenten, die jeweils relativ einfachen Regeln gehorchen.⁵² Insektenschwärme entwickeln oft intelligente Lösungen für komplexe Probleme, obwohl keines der einzelnen Schwarmmitglieder für sich genommen die dafür nötige Intelligenz besitzt – ein Beispiel ist die Architektur von Kolonien.

DARPA kündigte 2003 an, ein Bataillon von 120 Militärrobotern (produziert von I-Robot, ein von Robotikpionier Rodney Brooks gegründetes Unternehmen) mit Schwarmintelligenz-Software auszustatten, um das organisierte Verhalten von Insekten nachzuahmen.⁵³ Indem Roboter kleiner und zahlreicher werden, wird selbstorganisierender Schwarmintelligenz eine zunehmend wichtige Rolle zukommen.

Das Militär hat auch erkannt, dass Entwicklungszeiten verkürzt werden müssen. Bisher verstrich über ein Jahrzehnt von der Erforschung bis zum Einsatz militärischer Projekte. Doch die Dauer von Paradigmenwechseln halbiert sich alle zehn Jahre, und so muss auch die Entwicklungszeit kleiner werden – viele Waffensysteme sind bei ihrem ersten Feldeinsatz bereits überholt. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu lösen, besteht darin, neue

Waffen in Simulationen zu testen, wodurch neue Systeme sehr viel schneller konzipiert, gebaut und getestet werden könnten, als wenn man, wie bisher üblich, Prototypen baut und im Praxiseinsatz testet (und nicht selten pulverisiert).

Eine weitere wichtige Entwicklung besteht darin, das Personal weitgehend von den Kampfhandlungen wegzuverlagern, um menschliche Verluste zu minimieren. Dies kann erreicht werden, indem man Fahrer und Piloten per Fernsteuerung arbeiten lässt. Ohne menschliche Besatzung können Fahrzeuge sehr viel flexibler gestaltet und für riskantere Missionen eingesetzt werden. Durch Verzicht auf Lebenserhaltungssysteme kann zudem die Größe reduziert werden. Die Generäle sind sogar noch weiter entfernt. Tommy Franks befahl den Afghanistankrieg von einem Bunker in Katar aus.

Intelligenter Staub. DARPA arbeitet auch an Geräten, die noch kleiner sind als Vögel und Hummeln, sogenanntem „Intelligenten Staub“: komplexe Sensorsysteme, kaum größer als die Spitze einer Nadel. Einmal ausgereift könnten Millionen dieser Geräte über feindlichem Gebiet versprüht werden, extrem detaillierte Aufklärung liefern und letztlich auch zu Kampfpurposes eingesetzt werden (beispielsweise durch Nanowaffen). Energie wird der intelligente Staub aus nanogefertigten Brennstoffzellen sowie aus mechanischer Energie der Eigenbewegung, aus Wind und aus Thermik beziehen.

Suchen wir einen bestimmten Feind? Oder versteckte Waffen? Massen von praktisch unsichtbaren Spionen könnten jeden Quadratzentimeter des feindlichen Territoriums überwachen, jede Person identifizieren (durch thermische und elektromagnetische Bildgebung, eventuell DNS-Tests und andere Verfahren), jede Waffe aufspüren und sogar feindliche Ziele zerstören.

Nanowaffen. Der nächste Schritt nach intelligentem Staub sind Nanowaffen, die größere Waffen überflüssig machen werden. Der einzige Weg für einen Feind, diesem breit verstreuten Kampfmittel zu begegnen, ist der Einsatz eigener Nanotechnik. Die Effektivität von Nanomaschinen kann

drastisch vergrößert werden, indem man sie mit der Fähigkeit ausstattet, sich selbst zu replizieren. Damit sind jedoch auch ernste Gefahren verbunden, mehr dazu in **Kapitel 8**.

Nanotechnik kommt bereits in diversen militärischen Anwendungen zum Einsatz: Nanobeschichtungen für verbesserte Panzerung; Labor-Chips zur schnellen Entdeckung und Identifikation chemischer und biologischer Substanzen; Nanokatalysatoren für Gebietsdekontamination; intelligente Materialien, die sich für verschiedene Zwecke selbst strukturieren; biozide Nanopartikel in Uniformen um Wundinfektionen vorzubeugen; Kombinationen von Kunststoff und Nanoröhren für extrem stabile Materialien. Die University of Illinois hat beispielsweise einen selbstheilenden Kunststoff entwickelt: Das Kunststoffgerüst enthält winzige Gefäße mit flüssigen Monomeren und einen Katalysator; entsteht ein Riss, so brechen die Gefäße und der Riss wird automatisch versiegelt.⁵⁴

Intelligente Waffen. Wir haben uns bereits von primitiven, auf gut Glück in Richtung der feindlichen Stellung gefeuerten Raketen zu intelligenten Marschflugkörpern, die durch Mustererkennung zahlreiche taktische Entscheidungen treffen, weiterentwickelt. Wir benutzen aber auch immer noch primitive Projektile in Form von Gewehrkugeln – intelligente Kugeln sind ein weiteres militärisches Forschungsziel.

Indem militärische Waffen kleiner und zahlreicher werden, ist es weder wünschenswert noch praktikabel, jedes einzelne Gerät von Menschenhand zu steuern. Mehr autonome Steuerung ist daher ein weiteres wichtiges Ziel. Sobald Maschinenintelligenz zur biologischen menschlichen Intelligenz aufschließt, werden viele Systeme vollständig autonom sein.

VR. Virtuelle Realität ist schon heute praxisrelevant: bei der Bedienung ferngesteuerter Systeme, wie dem bewaffneten Predator der U.S. Air Force.⁵⁵ Selbst wenn ein Soldat ein Waffensystem (beispielsweise einen Abrams-Panzer) vor Ort von innen steuert, braucht er kein Fenster, um zu sehen, was draußen vor sich geht. Virtuelle Umgebungen liefern ein Bild der realen Umgebung und ermöglichen eine erfolgreiche Steuerung. Auch für die Steuerung von Schwarm-Waffensystemen werden virtuelle

Umgebungen nötig sein, welche die komplexen Informationen dieser verteilten Systeme integrieren und darstellen.

Ende der 2030er und in den 2040ern, wenn sich der menschliche Körper 3.0 und die Vorherrschaft nichtbiologischer Intelligenz abzeichnen, wird Cyberkriegführung eine wichtige Rolle spielen. Wenn alles Information ist, wird das Vermögen, die eigenen Informationen zu schützen und die Kommunikation des Feindes zu stören, der Schlüssel zum militärischen Erfolg sein.

...für die Bildung

Wissenschaft ist organisiertes Wissen. Weisheit ist organisiertes Leben.

IMMANUEL KANT (1724–1804)

Bildung wird in der heutigen Welt – auch in modernen Gesellschaften – immer noch ungefähr auf die gleiche Weise vermittelt wie in mittelalterlichen Klosterschulen. Schulen sind nach wie vor zentralisierte Institutionen, die aus einer oft zu knapp bemessenen Menge an Gebäuden und Lehrern bestehen. Die Qualität der Bildung variiert stark, je nach Wohlstand der Gemeinde (in Amerika wird Bildung beispielsweise traditionell über die Grundsteuer finanziert), was die soziale Ungerechtigkeit weiter vergrößert.

Wie alle anderen Institutionen wird auch die Bildung zu einem dezentralen System übergehen, in dem jeder Mensch gleichermaßen Zugang zu Wissen und Unterricht höchster Qualität hat. Diese Entwicklung steckt noch in den Anfängen, doch schon heute bieten das Web, Suchmaschinen sowie kostenlose, hochwertige Unterrichtsmaterialien und zunehmend effektive Computeranweisungen einen breiten und erschwinglichen Zugang zu Bildung.

Die meisten größeren Universitäten bieten mittlerweile Onlinekurse an, viele davon frei zugänglich. Das MIT war hier Vorreiter mit der Initiative OpenCourseWare (OCW). Das MIT stellt neunhundert Kurse, die Hälfte des Gesamtangebots, kostenlos ins Internet – und leistet damit bereits einen

großen Beitrag zur Bildung weltweit.⁵⁶ Brigitte Bouissou schreibt: „Als Mathelehrerin in Frankreich möchte ich dem MIT [...] für [diese] gut verständlichen Vorlesungen danken, die mir eine große Hilfe bei der Vorbereitung meines eigenen Unterrichts sind.“ Sajid Latif, Lehrer in Pakistan, hat die OCW-Vorlesungen des MIT in seinen Stoffplan integriert. Ein wesentlicher Teil der Ausbildung seiner Schüler besteht nun in MIT-Kursen, denen sie virtuell beiwohnen.⁵⁷ Das MIT will bis 2007 sein komplettes Lehrangebot online und quelloffen (also für nichtkommerzielle Nutzung kostenlos) verfügbar machen.

Der komplette Theorieunterricht der U.S.-Army ist bereits webbasiert. Der Zugang zu kostengünstigen und zunehmend hochwertigen Unterrichtsmaterialien stärkt auch den Trend zum Privatunterricht.

Die Infrastrukturkosten für audiovisuelle Kommunikation über das Internet in hoher Qualität sinken rapide: um etwa 50 Prozent jährlich (wie in **Kapitel 2** besprochen). Gegen Ende des Jahrzehnts wird es möglich sein, in unterentwickelten Teilen der Welt günstige Zugangsmöglichkeiten zu hochwertigem Unterricht für alle Bildungsstufen, von Vorschule bis Promotion, einzurichten. Der Zugang zu Bildung wird nicht länger durch den Mangel an gut ausgebildeten Lehrkräften in den einzelnen Städten und Dörfern beschränkt sein.

Immer intelligentere Lernprogramme („computer-assisted intruction“, CAI) werden jedem Schüler ein individuell angepasstes Lernen ermöglichen. Neue Generationen von Software sind in der Lage die Stärken und Schwächen jedes Schülers zu erfassen und Strategien zu entwickeln, um die Problembereiche anzugehen. Ein von mir gegründetes Unternehmen, Kurzweil Educational Systems, stellt Software her, die an Zehntausenden von Schulen eingesetzt wird, um Schülern mit Lesebehinderungen Zugang zu gewöhnlichen gedruckten Texten zu gewähren und ihre Lesefähigkeiten zu verbessern.⁵⁸

In Ermangelung ausreichender Bandbreite und dreidimensionaler Bildtechnik sind die heutigen virtuellen Umgebungen noch nicht das Gleiche wie „dabei zu sein“ – doch das wird sich ändern. In den frühen 2010er Jahren wird es umfassende, hochauflösende und sehr überzeugende virtuelle Umgebungen geben. Die meisten Hochschulen werden dem

Vorbild des MITs folgen und Schüler werden dem Unterricht immer häufiger virtuell beiwohnen. Experimente in Chemie, Atomphysik und anderen Fächern können in hochwertigen virtuellen Labors durchgeführt werden. Schüler werden sich mit einem virtuellen Thomas Jefferson oder Thomas Edison unterhalten oder sich selbst in einen virtuellen Thomas Jefferson verwandeln können. Es wird Unterricht in vielen verschiedenen Sprachen für alle Stufen geben. Die nötige Hardware, um diese virtuellen, hochauflösenden Klassenzimmer zu betreten, wird selbst in der Dritten Welt verfügbar und erschwinglich sein. Schüler aller Altersstufen, von Kleinkindern bis zu Erwachsenen, werden überall und zu jeder Zeit Zugang zum weltbesten Bildungsangebot haben.

Das Bildungswesen wird sich erneut wandeln, wenn wir mit nichtbiologischer Intelligenz verschmelzen. Denn dann werden wir die Möglichkeit haben, Wissen und Fähigkeiten einfach herunterzuladen, zumindest in den nichtbiologischen Teil unserer Intelligenz. Für unsere Maschinen ist das bereits Routine. Soll unser Laptop die neuesten Tricks in Sachen Sprach- und Schrifterkennung, Übersetzung und Internetsuche lernen, so bedarf es lediglich eines raschen Downloads des entsprechenden Musters (das heißt, der Software). Unser Gehirn verfügt (noch) über keine vergleichbare Kommunikationsschnittstelle, über die wir Gelerntes in Form von Verbindungs- und Neurotransmittermustern herunterladen könnten. Dies ist eine der grundsätzlichen Einschränkungen des biologischen Paradigmas, auf dem unser Denken derzeit beruht – eine Beschränkung, die wir durch die Singularität überwinden werden.

...für die Arbeit

Wenn nämlich jedes Werkzeug auf Anordnung oder mit eigener Voraussicht seine Aufgabe erledigen könnte, [...] wenn die Weberschiffchen von allein die Webfäden durcheilten und die Schlagplättchen Kithara spielten, dann brauchten die Meister keine Gehilfen und die Herren keine Sklaven.

ARISTOTELES

Vor Erfindung der Schrift war fast jede Erkenntnis neu (zumindest für die kleine Gruppe von Menschen, die davon erfuhr). Wenn man am Anfang steht, ist alles neu. In der heutigen Zeit

geschieht all unser geistiges Schaffen im Bewusstsein des Bestehenden und des davor Bestehenden. In der frühen posthumanen Ära wird wieder alles neu sein, denn Dinge, die übermenschliche Fähigkeiten erfordern, wurden noch nicht durch Homer oder Da Vinci oder Shakespeare vorweggenommen.

VERNOR VINGE⁵⁹

Ein Teil [meines Bewusstseins] lebt nun im Internet und scheint stets dort zu verweilen. [...] Ein Schüler kann ein Lehrbuch offen haben. Der Fernseher läuft ohne Ton. [...] Aus den Kopfhörern kommt Musik. [...] zwischen E-Mail und Chat ist ein Fenster mit den Hausaufgaben. [...] Ein Multitask-Schüler zieht die Onlinewelt der physikalischen Welt vor. „Das reale Leben“, sagt er, „ist lediglich ein weiteres Fenster.“

CHRISTINE BOESE, BEZÜGLICH ERKENNTNISSEN VON PROFESSOR SHERRY TURKLE (MIT)⁶⁰

Thomas Hobbes beschrieb 1651 das „Leben der Menschen“ als „einsam, armselig, garstig, brutal und kurz“.⁶¹ Dies mag eine treffende Beschreibung der damaligen Verhältnisse sein, doch seither hat sich – zumindest in der entwickelten Welt – vieles gebessert. Selbst in Entwicklungsländern hinkt die Lebenserwartung der unseren nur knapp hinterher. Technische Neuentwicklungen beginnen gewöhnlich mit überteuerten Produkten, die nicht sehr gut funktionieren, gefolgt von etwas weniger teuren, etwas besseren Produkten – bis die Technik dann schließlich ausgereift ist, sprich effizient, überall verfügbar und beinahe kostenlos. Radio und Fernsehen haben diesen Weg beschritten, ebenso wie das Mobiltelefon. Internetzugang ist noch nicht ganz ausgreift, aber bereits relativ günstig und funktionstüchtig.

Der Zeitabstand zwischen den ersten Pionieren und den letzten Nachzüglern beträgt derzeit etwa zehn Jahre, doch infolge der Verdopplung der Paradigmenwechselrate mit jedem neuen Jahrzehnt wird sich diese Adaptionzeit bis Mitte der 2010er Jahre auf fünf Jahre verkürzen und bis Mitte der 2020er auf zwei bis drei Jahre. Angesichts des enormen, mit den GNR-Techniken einhergehenden Wohlstands, wird die Unterschicht in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten weitgehend verschwinden (siehe Diskussion des Weltbank-Berichts von 2004 in **Kapitel 2** und **9**). Dennoch wird der immer schnellere Fortschritt vermutlich fundamentalistische und luddistische Reaktionen hervorrufen.

Mit der Verfügbarkeit molekularer Nanofertigung werden die Kosten aller physikalischen Produkte auf wenige Cents pro Kilogramm sinken – zuzüglich der Kosten für die Information zur Steuerung des Fertigungsprozesses, welche den wahren Wert des Produkts ausmachen wird. Davon sind wir gar nicht mehr so weit entfernt: Schon heute ist in automatisierten Fabriken jeder Herstellungsschritt, von Konzeption über Materialbeschaffung bis zur Fertigung, von Software bestimmt. Der auf Informationsprozesse zurückführbare Anteil der Herstellungskosten variiert zwischen den Produktkategorien, ist jedoch durch die Bank weg steigend und nähert sich rasch der 100-Prozent-Marke. Ende der 2020er wird Information (nahezu) allein den Wert praktisch aller Produkte – Kleidung, Nahrung, Energie und natürlich Elektronik – ausmachen. So wie heute wird es sowohl proprietäre als auch freie Versionen aller Produkte und Dienste geben.

Geistiges Eigentum. Wenn der Wert von Produkten und Diensten in ihrer Information liegt, dann ist der Schutz von Informationsrechten von entscheidender Bedeutung für die Geschäftsmodelle, die das Kapital für die Erzeugung neuer, wertvoller Informationen liefern. Die Probleme, die sich durch illegale Downloads für die heutige Unterhaltungsindustrie ergeben, sind ein Vorgeschmack auf die zukünftigen Kämpfe um geistiges Eigentum, wenn praktisch alle Werte in Informationen bestehen. Existierende und neue Geschäftsmodelle, die auf geistigem Eigentum beruhen, müssen geschützt werden, um die Anreize für die Schaffung neuen geistigen Eigentums zu erhalten. Das Problem der einfachen Kopierbarkeit von Information wird jedoch auch in Zukunft nicht verschwinden, darum muss die Industrie ihre Geschäftsmodelle auf die Dauer den öffentlichen Erwartungen anpassen.

Beispiel Musikindustrie: Anstatt die Initiative mit neuen Paradigmen zu ergreifen, klammerte man sich (bis vor Kurzem) stur an das (seit den Tagen meines Vaters als jungem Musiker unveränderte) Prinzip, teure Alben in Läden zu verkaufen. Informationspiraterie in großem Maßstab lässt sich jedoch nur vermeiden, wenn die kommerziellen Preise (in der öffentlichen Wahrnehmung) in einem vernünftigen Rahmen bleiben. In der Mobilfunkindustrie kam die Piraterie-Problematik nie wirklich auf, da mit

dem technischen Fortschritt schnell die Tarife fielen. Wären die Telefentarife heute noch dieselben wie in meiner Kindheit (als man für ein eingehendes Ferngespräch alles stehen und liegen ließ), so gäbe es ein vergleichbares Maß an Telefonpiraterie, die technisch nicht komplizierter ist als Musik-Raubkopien. Betrug im Telefonnetz wird jedoch weitgehend als kriminell empfunden, da die Mobilfunktarife als angemessen gelten.

Geschäftsmodelle, in denen es um geistiges Eigentum geht, müssen ohnehin angepasst werden. Der Download von Filmen war aufgrund der Dateigrößen lange schwierig, doch das ändert sich. Die Filmindustrie muss daher neue, profitable Formate finden, beispielsweise HD-Filme per Mausklick. Musiker verdienen gewöhnlich vorwiegend an Liveauftritten, doch auch dieses Modell wird mit der Verfügbarkeit voll umfassender virtueller Realität im nächsten Jahrzehnt ins Wanken geraten. Alle Industrien werden ihre Geschäftsmodelle immer wieder neu erfinden müssen, wofür ebenso viel Kreativität nötig sein wird, wie für die Schaffung von geistigem Eigentum an sich.

Die erste industrielle Revolution hat die Reichweite unseres Körpers vergrößert, die zweite vergrößert die Reichweite unseres Geistes. Wie schon erwähnt, ging die Beschäftigung in Fabriken und in der Landwirtschaft in den USA im letzten Jahrhundert von 60 auf 6 Prozent zurück. In den nächsten Jahrzehnten wird praktisch jede Form geistiger und körperlicher Arbeit automatisiert werden. Berechnung und Kommunikation werden nicht mehr in einzelnen Geräten ablaufen, sondern über ein nahtloses Netz intelligenter Ressourcen, das uns umgibt. Schon heute geht es in den meisten Berufen auf die eine oder andere Weise um Schaffung oder Verbreitung geistigen Eigentums – oder um direkte persönliche Dienstleistungen (Gesundheit, Fitness, Bildung und so weiter). Die Produktion von geistigem Eigentum – unsere künstlerische, soziale und wissenschaftliche Kreativität – wird weiter zunehmen und durch die Verschmelzung mit nichtbiologischer Intelligenz massiv verstärkt werden. Persönliche Dienstleistungen werden sich weitgehend in virtuelle Umgebungen verlagern, zumal wenn die virtuelle Realität all unsere Sinne erfasst.

Dezentralisierung. In den nächsten Jahrzehnten wird es starke Tendenzen zur Dezentralisierung geben. Heute beziehen wir unsere Energie aus leicht verwundbaren, zentralisierten Kraftwerken und benutzen Schiffe und Treibstoffleitungen zum Transport. Durch nanogefertigte Brennstoffzellen und Solartechnik wird jedoch eine verteilte, integrierte Energieinfrastruktur entstehen. Molekulare Nanofertigung wird ebenfalls dezentral verteilt sein, in Form kostengünstiger Minifabriken. Virtuelle Realität wird uns erlauben, überall alles Mögliche zu tun, ohne uns physisch vom Fleck zu bewegen, und wird somit zentralisierte Einrichtungen, wie Bürogebäude und Großstädte, überflüssig machen.

Wenn wir – mit der Version 3.0 unseres Körpers – beliebige Formen annehmen können und unsere überwiegend nichtbiologischen Gehirne nicht mehr an biologische Grenzen gebunden sind, wird man sich mit der Frage beschäftigen, was eigentlich menschlich ist. Die hier beschriebenen Wandlungen sind keine plötzlichen Sprünge, sondern Serien vieler kleinerer Schritte. Obwohl diese Schritte immer schneller aufeinanderfolgen, finden sie zumeist schnell allgemeine Akzeptanz. Künstliche Befruchtungsverfahren waren beispielsweise zunächst umstritten, wurden dann aber schnell akzeptiert und eingesetzt. Andererseits werden Veränderungen auch immer fundamentalistischen und luddistischen Widerstand hervorrufen, der mit steigender Fortschrittsrate stärker werden wird. Doch von scheinbaren Kontroversen abgesehen wird der Gewinn an Gesundheit, Wohlstand, Ausdrucksmöglichkeit, Kreativität und Wissen nicht zu leugnen sein.

...für das Spielen

Technik [...] als Kniff, die Welt so einzurichten, dass wir sie nicht erleben müssen.

MAX FRISCH, *HOMO FABER*

Das Leben ist entweder ein kühnes Abenteuer oder nichts.

HELEN KELLER

Spiel ist nur eine andere Form von Arbeit und spielt eine große Rolle bei der Erzeugung aller Arten menschlichen Wissens. Ein Kind erwirbt beim Spielen mit Puppen und Bauklötzen Wissen, indem es aus seinen Erfahrungen lernt. Spielerische Tanzbewegungen sind nichts anderes als ein kreativer Prozess (man denke nur an die Jugendlichen in armen amerikanischen Stadtvierteln, die Breakdance erfanden und somit die Hip-Hop-Bewegung auslösten). Einstein „arbeitete“ auf einem Schweizer Patentamt, doch es waren Gedankenspiele, aus denen seine bahnbrechenden Relativitätstheorien hervorgingen. Wenn der Krieg der Vater der Erfindung ist, dann ist das Spielen ihre Mutter.

Schon lässt sich nicht mehr klar zwischen Computerspiel und Lernsoftware unterscheiden. *Die Sims 2*, ein 2004 erschienenes Computerspiel, enthält KI-gesteuerte Figuren mit eigenen Zielen und Intentionen. Sie haben kein festgelegtes Skript und verhalten sich unvorhersehbar – die Geschichte ergibt sich aus ihren Interaktionen. Einerseits handelt es sich um ein Spiel, andererseits werden hier soziale Kompetenzen vermittelt. Auch in immer realistischeren Sport-Computerspielen können Fähigkeiten und Verständnis erworben werden.

In den 2020ern wird voll umfassende virtuelle Realität einen riesigen Spielplatz voll überzeugender Umgebungen und Erfahrungsmöglichkeiten bieten. VR wird neue Formen der Kommunikation ermöglichen und eine große Auswahl verschiedener Umgebungen bieten. Diese Umgebungen werden anfänglich noch nicht ganz überzeugend sein, aber Ende der 2020er nicht mehr von der Realität unterscheidbar: Sie werden all unsere Sinne sowie unsere Emotionen (in neuronaler Form) erfassen. Mit Beginn der 2030ern verschwimmen die Trennlinien zwischen Mensch und Maschine, Realität und Virtualität, zwischen Spiel und Arbeit.

*...für das kosmische Schicksal: Weshalb wir
wahrscheinlich alleine sind im Universum*

Das Universum ist nicht nur seltsamer als wir annehmen, sondern auch seltsamer als wir annehmen können.

J. B. S. HALDANE

Wie kommt das Universum dazu, sich selbst durch eines seiner kleinsten Produkte infrage zu stellen?

D. E. JENKINS, ANGLIKANISCHER THEOLOGE

Was berechnet das Universum? Soweit wir wissen, nicht die Antwort auf eine einzige Frage. [...] Vielmehr berechnet das Universum sich selbst. Mit der Software des Standardmodells der Teilchenphysik berechnet das Universum Quantenfelder, Chemikalien, Bakterien, menschliche Wesen, Sterne und Galaxien. Indem es rechnet, entwirft es seine eigene Raumzeitgeometrie mit der maximalen im Rahmen der physikalischen Gesetze möglichen Genauigkeit. Berechnung ist Existenz.

SETH LLOYD UND Y. JACK NG⁶²

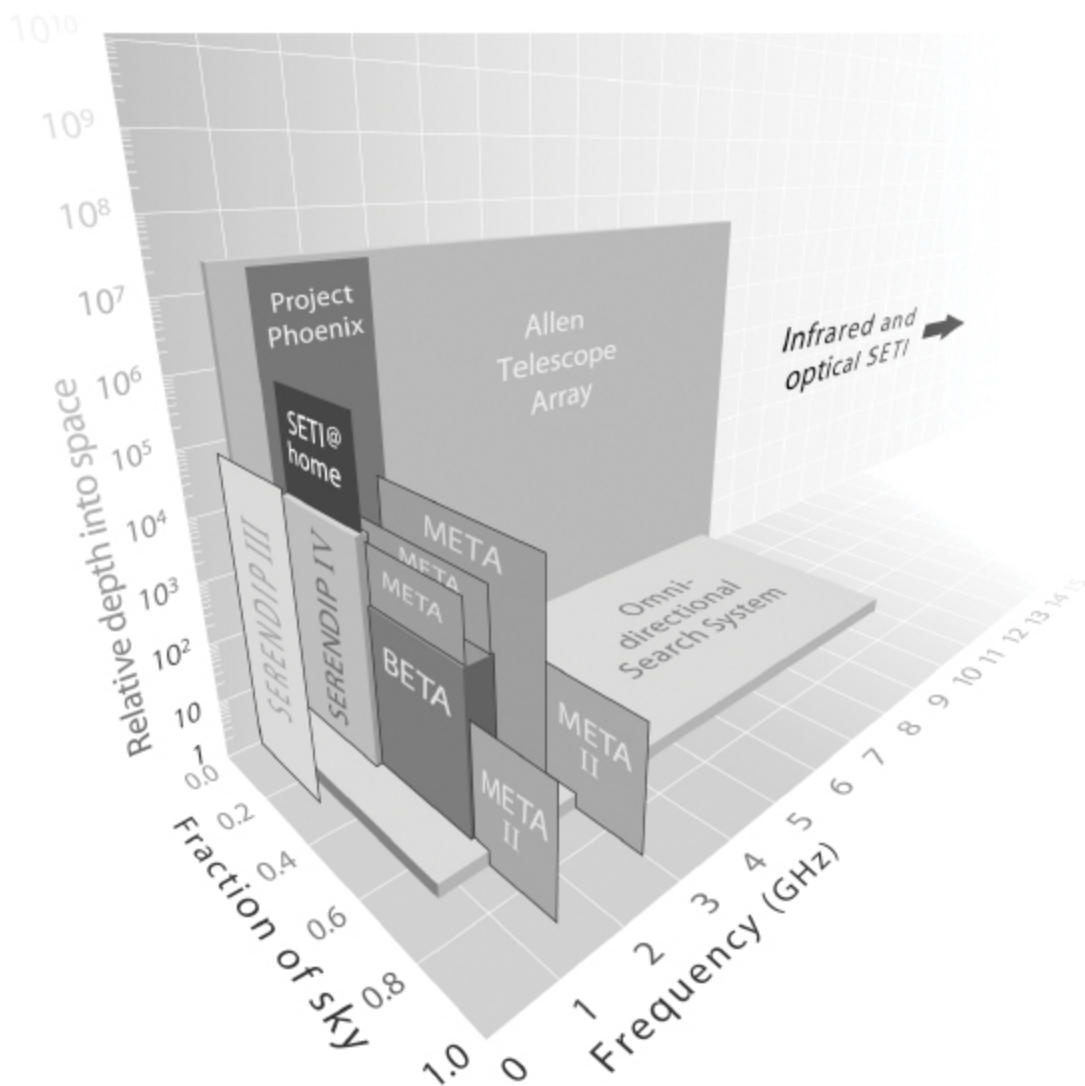
In einer naiven Betrachtung des Kosmos – die auf die Zeit vor Kopernikus zurückgeht – ist die Erde der Mittelpunkt des Universums und die menschliche Intelligenz seine größte Gabe (neben Gott). Eine neuere, sachlich fundiertere Ansicht ist die folgende: Zwar ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich auf einem anderen Planeten in der Umlaufbahn eines anderen Sterns eine technisierte Spezies entwickelt, sehr gering. Dennoch müsste es, aufgrund der großen Anzahl von Sternen im Universum (Milliarden mal Billionen), viele (Milliarden oder gar Billionen) solcher Spezies geben.

Dies ist der Gedanke hinter dem SETI*-Projekt. Es gibt jedoch Gründe zum Zweifel an der „SETI-Annahme“, dass außerirdische Intelligenz existiert.

Die Logik hinter der SETI-Annahme ist folgende: Gängige Interpretationen der Drake-Gleichung (siehe unten) gehen davon aus, dass es im Universum zahlreiche (Milliarden) außerirdische Zivilisationen gibt, Tausende oder Millionen allein in unserer Galaxie. Wir haben bislang nur einen winzigen Teil des Heuhaufens (des Universums) durchsucht, deshalb muss uns das bisherige Fehlen jeglicher Spur der Nadel (außerirdischer Intelligenz) nicht entmutigen. Wir bemühen uns zunehmend, den restlichen Heuhaufen zu erkunden.

Das folgende Diagramm aus *Sky and Telescope* illustriert den Umfang des SETI-Projekts. Darin sind drei verschiedene Parameter – Erdabstand,

Frequenzbereich und Himmelsausschnitt – verschiedener Suchprojekte dargestellt.⁶³



Das Diagramm enthält zwei für die Zukunft geplante Systeme. Der Allen Telescope Array (benannt nach Microsoft Mitbegründer Paul Allen) setzt auf viele kleine Parabolantennen anstatt weniger großer Antennen – 2005 sollen die ersten zweiunddreißig Schüsseln einsatzbereit sein. Die insgesamt geplanten 350 Antennen (Fertigstellung voraussichtlich 2008) werden einer 10.000 Quadratmeter großen einzelnen Schüssel entsprechen. Das System soll bis zu 100 Millionen Frequenzen gleichzeitig empfangen können und das komplette Mikrowellenspektrum abdecken. Eine der geplanten Anwendungen ist das Abhören von Millionen von Sternen unserer Galaxie. Das Projekt basiert auf intelligenter Software, die anhand

der vielen kostengünstigen Antennen ein äußerst akkurates Signal berechnet.⁶⁴

Die Ohio State University baut das Omnidirectional Search System, das auf eine große Anzahl einfacher Antennen setzt, um mit Hilfe der Prinzipien der Interferometrie (die Lehre von der Interferenz zwischen Signalen) ein hochaufgelöstes Bild des gesamten Himmels zu errechnen.⁶⁵ Andere Projekte erweitern den elektromagnetischen Frequenzbereich, um Infrarot und sichtbares Licht abzudecken.⁶⁶

Neben den drei Parametern des Diagramms auf der vorigen Seite gibt es noch sechs weitere, die von Bedeutung sind – beispielsweise Polarisierung (Ausrichtung der Schwingungsebene der elektromagnetischen Wellen). Aus obenstehendem Diagramm können wir schließen, dass bisher nur kleine Ausschnitte des neundimensionalen „Parameterraums“ durch SETI erfasst wurden. Folglich, so das Argument, ist es kaum überraschend, dass wir noch nicht auf Zeichen außerirdischer Intelligenz gestoßen sind.

Doch wir suchen nicht eine einzelne Nadel. Dem Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs zufolge ist eine Intelligenzform, die über primitive mechanische Technik verfügt, nur wenige Jahrhunderte entfernt von jener Entwicklungsstufe, die wir hier auf der Erde im zweiundzwanzigsten Jahrhundert erreichen dürften. Der russische Astronom N. S. Kardashev klassifiziert eine Zivilisation als „Typ II“, wenn es ihr gelungen ist, die elektromagnetische Strahlung ihrer Sonne (in unserem Fall 4×10^{26} Watt) für Kommunikation zu nutzen.⁶⁷ Meinen Hochrechnungen zufolge (siehe **Kapitel 3**) werden wir diese Stufe im zweiundzwanzigsten Jahrhundert erreichen. Da die technische Entwicklung der zahlreichen von SETI-Theoretikern postulierten Zivilisationen sicher zeitlich versetzt wäre, müssten uns viele dieser Zivilisationen bereits weit voraus sein – es müsste schon seit Langem Zivilisationen vom Typ II geben. Diese Zivilisationen hatten genug Zeit, ihre Galaxien zu bevölkern und sich zu Typ III zu entwickeln: zu einer Zivilisation, welche die Energie ihrer gesamten Galaxie (in unserem Fall 4×10^{37} Watt) zu ihrem Nutzen einsetzt. Selbst wenn nur eine einzige Zivilisation existierte, würde sie Milliarden oder Billionen von „Nadeln“ aussenden – das heißt, ihre zahllosen Informationsprozesse und deren Nebenprodukte würden eine Vielzahl an

Punkten im SETI-Parameterraum hinterlassen. Obwohl das SETI-Projekt nur kleine Ausschnitte dieses Raumes abdeckt, ist es unwahrscheinlich, dass wir eine Zivilisation von Typ II übersehen, geschweige denn von Typ III. Vor dem Hintergrund, dass es nicht nur eine, sondern eine große Anzahl solcher Zivilisationen geben soll, ist es merkwürdig, dass wir noch von keiner erfahren haben. Dies ist das sogenannte Fermi-Paradoxon.

Die Drake-Gleichung. SETI ist vor allem motiviert durch eine 1961 vom Astronomen Frank Drake aufgestellte Gleichung zur Schätzung der Anzahl intelligenter (oder besser gesagt: Funksignale versendender) Zivilisationen in unserer Galaxie.⁶⁸ (Es steht anzunehmen, dass die Analyse für andere Galaxien vergleichbar ausfällt). Drakes Formel lautet:

Anzahl kommunikationsfähiger Zivilisationen = $N \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times f_L$
wobei:

N = Anzahl der Sterne in der Milchstraße. Derzeitige Schätzungen liegen bei 100 Milliarden (10^{11}).

f_p = Anzahl der Sterne mit Planeten in ihrer Umlaufbahn. Derzeitige Schätzungen liegen bei 20 bis 50 Prozent.

n_e : Durchschnittliche Anzahl an Planeten pro Sonnensystem, auf denen Leben entstehen kann. Hier gehen die Schätzungen weit auseinander – manche gehen von einem Planeten oder mehr aus (das hieße, jeder Stern mit Planeten hätte im Schnitt mindestens einen Planeten, auf dem Leben entstehen kann). Andere Schätzungen sind deutlich niedriger, etwa eins zu eintausend oder weniger.

f_l : Anteil dieser Planetenmenge (Planeten auf denen Leben entstehen kann), in dem tatsächlich Leben entsteht. Hier gibt es alle möglichen Schätzwerte von nahezu 0 bis knapp 100 Prozent.

f_i : Anteil der belebten Planeten, in dem sich intelligentes Leben entwickelt. f_l und f_i sind die kontroversesten Faktoren der Drake-Gleichung. Auch hier gibt es alle möglichen Schätzungen von knapp 0

Prozent (Leben wird sehr selten intelligent) bis knapp 100 Prozent (hat Leben einmal Fuß gefasst, so folgt mit Sicherheit auch Intelligenz).

f_c : Anteil der Planeten mit intelligentem Leben, in dem mit Funksignalen kommuniziert wird. Die Schätzungen für f_c sind in der Regel höher als für f_l und f_i , aufgrund der (sinnvollen) Annahme, dass eine ausreichend intelligente Spezies mit großer Wahrscheinlichkeit auch Funktechnik entdecken und benutzen würde.

f_L : Anteil der Lebensdauer des Universums, während dem eine Zivilisation im Durchschnitt über Funkwellen kommuniziert.⁶⁹ Unsere Zivilisation kommuniziert beispielsweise etwa seit einhundert Jahren per Funkübertragung. Bei einer Dauer des Universums von zehn bis zwanzig Milliarden Jahren ergibt sich für die Erde also bislang ein Faktor f_L von 10^{-8} . Wenn wir noch neunhundert Jahre weiterfunken, steigt der Faktor auf 10^{-7} . Die allgemeine Schätzung für f_L hängt von verschiedenen Überlegungen ab. Wenn sich eine Zivilisation selbst zerstört, weil es ihr nicht gelingt, die destruktiven Kräfte ihrer Technik (Beispiel Kernfusion oder selbstreplizierende Nanotechnik) zu bändigen, so findet ihre Funkaktivität ein jähes Ende. Wir wissen von irdischen Zivilisationen (zum Beispiel die Mayas), deren Gesellschaft schlagartig zusammenbrach (und damit auch ihre wissenschaftlichen Bemühungen). Andererseits ist es unwahrscheinlich, dass alle Zivilisationen auf diese Weise enden. Die Möglichkeit einer plötzlichen Zerstörung reduziert die Anzahl kommunikationsfähiger Zivilisationen also nur um einen gewissen Faktor.

Schwerwiegender ist die Tatsache, dass Zivilisationen sich irgendwann von der Funktechnik verabschieden und zu effektiveren Kommunikationswegen übergehen. Hier auf der Erde verlagern wir unsere Kommunikation von Funk auf Kabel und nutzen Faseroptik für Fernübertragung. Trotz der insgesamt massiv gestiegenen Bandbreite unserer Kommunikation ist darum die Menge an Information, die von der Erde ins Weltall gelangt, während des letzten Jahrzehnts in etwa konstant geblieben. Andererseits verzeichnen wir eine deutliche Zunahme von

drahtloser Kommunikation (Mobiltelefonie und drahtloses Internet, beispielsweise durch den neuen Wimax-Standard). Kommunikation könnte auch durch exotische Medien wie Gravitationswellen übertragen werden. Dennoch – selbst wenn elektromagnetische Signale nicht mehr zu den bevorzugten Kommunikationsmethoden einer Zivilisation gehörten, so würden sie wahrscheinlich trotzdem noch für bestimmte Zwecke eingesetzt. (Auf alle Fälle trägt f_L auch der Möglichkeit Rechnung, dass eine Zivilisation ihre Funkkommunikation vollständig einstellt).

Die Drake-Gleichung, das liegt auf der Hand, enthält viele Unsicherheiten. Viele SETI-Anhänger, die sich näher damit auseinandergesetzt haben, kommen zum Schluss, dass es allein in unserer Galaxie eine signifikante Anzahl kommunizierender Zivilisationen geben muss. Wenn wir beispielsweise annehmen, dass 50 Prozent der Sterne Planeten haben ($f_p = 0,5$), jeder dieser Sterne im Schnitt zwei Planeten hat, auf denen Leben entstehen könnte ($n_e = 0,5$), auf jedem zweiten dieser Planeten tatsächlich Leben entstanden ist ($f_l = 0,5$), dass die Hälfte dieser Planeten intelligentes Leben hervorbrachte ($f_i = 0,5$), dass die Hälfte davon über Funktechnik verfügt ($f_c = 0,5$), und dass diese Zivilisationen im Schnitt eine Million Jahre lang kommunizieren ($f_L = 10^{-4}$), so gibt es zufolge der Drake-Gleichung 1.250.000 Funksignale aussendende Zivilisationen in der Milchstraße. Seth Shostak beispielsweise, Chef-Astronom des SETI Institute, schätzt die Anzahl solcher Zivilisationen in der Galaxie auf zehntausend bis eine Million.⁷⁰ Carl Sagan schätzte eine Million, Drake zehntausend.⁷¹

Doch die oben genannten Parameter sind zugegebenermaßen recht optimistisch gewählt. Schätzen wir die Chancen für die Entwicklung von Leben – und insbesondere von Intelligenz – etwas vorsichtiger ein, so sieht das Ergebnis anders aus. Wenn wir annehmen, dass 50 Prozent der Sterne Planeten haben ($f_p = 0,5$), jedoch nur ein Zehntel davon Leben hervorbringen kann ($n_e = 0,1$; unter der Annahme, dass lebensfreundliche Bedingungen seltener sind), dass auf 1 Prozent dieser Planeten tatsächlich Leben entstanden ist ($f_l = 0,01$), auf 5 Prozent der belebten Planeten Intelligenz entstanden ist ($f_i = 0,05$; angesichts der langwierigen Evolution

auf der Erde), dass die Hälfte davon Funktechnik besitzt ($f_c = 0,5$) und im Schnitt zehntausend Jahre lang aktiv ist ($f_L = 10^{-6}$), so gibt es nach der Drake-Gleichung genau eine kommunizierende Zivilisation in der Milchstraße – und diese eine kennen wir bereits.

Letzten Endes ist es schwierig, anhand dieser Formel gute Argumente für oder gegen die Existenz außerirdischer Zivilisationen zu finden. Wenn wir etwas von der Drake-Gleichung lernen können, dann wie unsicher unsere Schätzungen sind. Bisher wissen wir nur, dass im Kosmos scheinbar Stille herrscht – zumindest haben wir bisher noch kein einziges Signal aufgefangen, dass auf außerirdische Intelligenz hinweist. Hinter dem SETI-Projekt steht die Annahme, dass es da draußen Millionen oder gar Milliarden kommunikationsfähiger Zivilisationen gibt (oder zumindest innerhalb unseres Lichtkegels – das heißt, dass die Signale früh genug in der Vergangenheit ausgesendet wurden, um uns heute zu erreichen). Doch soweit hat sich keine einzige Zivilisation (im Rahmen der SETI-Bemühungen) bemerkbar gemacht.

Betrachten wir nun die SETI-Annahme vor dem Hintergrund des Gesetzes vom steigenden Ertragszuwachs. Wie wir wissen, erfahren evolutionäre Prozesse eine inhärente Beschleunigung. Des Weiteren verläuft technische Entwicklung bedeutend schneller als die relativ langwierige Evolution einer Technik schaffenden Spezies. In unserem Fall dauerte die Entwicklung von einer strom- und computerlosen Gesellschaft, deren schnellstes Transportmittel Pferde waren, bis zur heutigen hoch entwickelten Rechner- und Kommunikationstechnik gerade einmal zweihundert Jahre. Sobald eine Spezies über Elektronik und die Technik für Funkübertragungen verfügt, kann es daher nur wenige Jahrhunderte dauern, bis diese Spezies ihre Intelligenz in großem Stile erweitert.

Auf der Erde wird dieser Prozess insgesamt drei Jahrhunderte gedauert haben – eine extrem kurze Spanne in der kosmischen Zeitrechnung eines dreizehn bis vierzehn Milliarden Jahre alten Universums.⁷² Sobald eine Zivilisation eine mit der unsrigen vergleichbare Funktechnik hervorgebracht hat, so verstreichen meinem Modell zufolge nicht mehr als ein Jahrhundert – allerhöchstens zwei – bis sie sich zu einer Zivilisation vom Typ II entwickelt. Angenommen die SETI-Annahme wäre korrekt und

es gäbe Tausende oder Millionen von kommunikationsfähigen Zivilisationen in unserer Galaxie – Milliarden im Universum –, so wäre ihre Entstehung und Entwicklung weit über die Milliarden von Jahren, die das Universum andauert, verteilt. Manche Zivilisationen wären uns als voraus, manche hinterher. Jene Zivilisationen, die uns in der Entwicklung voraus wären, hätten aller Wahrscheinlichkeit nach nicht nur ein paar Jahrzehnte Vorsprung – sondern Millionen, wenn nicht Milliarden von Jahren.

Da zwischen der Entwicklung mechanischer Technik durch eine Spezies und der Explosion von Intelligenz und Kommunikation – der Singularität – nur wenige Jahrhunderte liegen, müsste es der SETI-Annahme zufolge Milliarden von Zivilisationen in unserem Lichtkegel (und Tausende oder Millionen in unserer Galaxie) geben, deren Technik die unsere in unvorstellbarem Maße übersteigt. In (zumindest einigen) Diskussionen um das SETI-Projekt begegnen wir derselben linearen Denkweise, die sich auch in allen anderen Gebieten findet: die Annahme, dass der technische Fortschritt einer Zivilisation, die unseren Entwicklungsstand erreicht hat, über Tausende oder gar Millionen von Jahren gleichmäßig weitergehen wird. Doch von der Erfindung der Funktechnik bis zur Entstehung einer Zivilisation, die Typ II weit übersteigt, vergehen nur wenige Hundert Jahre. Der Himmel sollte also nur so schwirren vor intelligenter Kommunikation.

Stattdessen herrscht Funkstille am Himmel. Die Stille im Kosmos ist merkwürdig und rätselhaft – oder in den Worten Enrico Fermis aus dem Sommer 1950: „Wo stecken sie alle?“⁷³ Es ist unwahrscheinlich, dass ausreichend entwickelte Zivilisationen ausschließlich über unauffällige Signale und exotische Frequenzen kommunizieren. Warum sind all die Außerirdischen so schweigsam?

Es gab verschiedene Versuche, das Fermi-Paradoxon zu erklären (welches zugegebenermaßen nur dann ein Paradoxon ist, wenn man ausreichend optimistische Parameter für die Drake-Gleichung wählt). Ein beliebtes Argument lautet, dass Zivilisationen sich möglicherweise selbst auslöschen, sobald sie technisch ausreichend entwickelt sind. Dies wäre eine plausible Erklärung, wenn wir es nur mit einer geringen Zahl von Zivilisationen zu tun hätten, doch der SETI-Annahme zufolge gibt es

mehrere Milliarden von Zivilisationen – und es fällt schwer zu glauben, dass diese allesamt der Selbstzerstörung zum Opfer fielen.

Andere Argumente haben ähnliche Schwachpunkte: Vielleicht haben die Außerirdischen beschlossen, uns (in unserer Primitivität) nicht zu stören und beobachten uns unbemerkt. (Eine ethische Richtlinie, die *Star Trek* Fans wohl vertraut sein dürfte). Doch wiederum ist es wenig plausibel, dass die Milliarden von Zivilisationen dort draußen gleichermaßen zu dieser Entscheidung gekommen sind. Oder vielleicht sind sie zu fortschrittlicheren Kommunikationsparadigmen übergegangen. Ich glaube wohl, dass es bessere Kommunikationswege als elektromagnetische Wellen gibt, und dass eine entwickelte Zivilisation (wie die unsere im nächsten Jahrhundert) diese Wege wahrscheinlich entdeckt und sich zunutze macht. Doch es ist äußerst unwahrscheinlich, dass elektromagnetische Wellen in Millionen von außerirdischen Zivilisationen überhaupt keine Rolle spielt, und sei es nur als Nebenprodukt anderer technischer Prozesse.

Dies spricht jedoch alles nicht gegen das SETI-Projekt an sich, das sehr ernst genommen werden sollte, denn ein negatives Ergebnis ist ebenso wichtig wie ein positives.

Ein zweiter Blick auf die Grenzen der Berechnung. Das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs hat noch andere Implikationen für die Intelligenz des Kosmos. In **Kapitel 3** haben wir den ultimativen kalten Laptop besprochen: Die optimale Rechenkapazität eines ein Kilo schweren Computers mit einem Liter Volumen beträgt etwa 10^{42} cps – genug um in zehn Mikrosekunden die Denkleistung zu erbringen, für die zehn Milliarden menschliche Gehirne zehntausend Jahre benötigen. Unter Annahme eines intelligenteren Energie- und Wärme-Managements kommen wir sogar auf 10^{50} cps.

Letzteres stellt schwindelerregende Anforderungen an die Technik. Doch die Frage ist nicht, was im Bereich unserer heutigen begrenzten Möglichkeiten liegt, sondern was eine höher entwickelte Zivilisation, die bereits über 10^{42} cps pro Kilogramm verfügt, erreichen kann. Eine solche Zivilisation wird wahrscheinlich einen Weg finden, um 10^{43} cps zu erreichen, und dann 10^{44} cps – und so weiter, Schritt für Schritt.

Wenn eine Zivilisation es einmal so weit gebracht hat, wird sie ihre Rechentechnik natürlich nicht auf Ein-Kilo-Portionen beschränken – ebenso wenig wie wir das heute tun. Wir müssen uns also überlegen, was eine Zivilisation mit der gesamten Masse und Energie in unserer Reichweite anfangen könnte. Die Erde hat eine Masse von etwa 6×10^{24} Kilogramm. Jupiter wiegt etwa $1,9 \times 10^{27}$ Kilogramm. Ignorieren wir Wasserstoff und Helium, so kommen wir auf $1,7 \times 10^{26}$ Kilogramm Materie in unserem Sonnensystem ohne die Sonne (vor der wir letztendlich auch nicht haltmachen werden). Die Gesamtmasse des Sonnensystems – den größten Teil davon macht die Sonne aus – beträgt etwa 2×10^{30} Kilogramm. Wenn wir die geschätzte maximale Rechenkapazität (für Nanocomputer) pro Kilo von 10^{50} cps auf die Masse des Sonnensystems anwenden, so erhalten wir eine grobe Obergrenze für das Berechnungspotenzial in unserer „Reichweite“ von 10^{80} cps.

Selbstverständlich gibt es praktische Einschränkungen, die es wahrscheinlich unmöglich machen, diese Obergrenze zu erreichen. Doch wenn wir auch nur ein zwanzigstel eines Prozents (0,0005) der Materie des Sonnensystems für Berechnungen einspannen, erhalten wir eine Kapazität von 10^{69} cps für „kalte“ Computer und 10^{77} für „heiße“ Computer.⁷⁴

Es gibt technische Überlegungen zu Berechnung in diesem Maßstab, die Wärmeentwicklung, interne Übertragungsgeschwindigkeiten, Zusammensetzung der Materie im Sonnensystem und viele andere Faktoren in Erwägung ziehen. Entsprechende Konzepte basieren auf reversibler Berechnung, doch wie in **Kapitel 3** erläutert, fällt auch hier ein gewisser Energieverbrauch an: für Fehlerkorrektur und Kommunikation von Berechnungsergebnissen. Der Computational Neuroscientist Anders Sandberg hat die Kapazität eines rechnenden „Objekts“ namens Zeus, das so groß wie die Erde ist, analysiert.⁷⁵ Dieser hypothetische Computer, bestehend aus etwa 10^{25} Kilogramm Kohlenstoff (etwa die 1,8-fache Erdmasse) in Diamantoid-Form, enthält 5×10^{37} Rechenknoten, die alle massiv parallelisiert sind. Zeus erreicht eine geschätzte Spitzenleistung von 10^{61} cps beziehungsweise 10^{47} Bits als Datenspeicher. Der größte limitierende Faktor in diesem Aufbau ist die mögliche Anzahl von Löschungen (maximal $2,6 \times 10^{32}$ Bitlöschungen pro Sekunde), die

größtenteils für die Korrektur von Fehlern durch kosmische Strahlung und Quanteneffekte aufgewendet werden müssen.

Der Astrophysiker Freeman Dyson präsentierte 1959 die Idee, einen Stern mit kugelförmigen Schalen zu umschließen, um sowohl eine Energiequelle als auch Lebensraum für eine zukünftige Zivilisation bereitzustellen. Es gibt verschiedene Konzepte für eine solche Dyson-Sphäre. Eines davon sieht eine dünne Schale vor, die den Stern tatsächlich vollständig umgibt; die Zivilisation lebt in der Schale und gibt Wärme (Infrarot-Energie) nach außen, auf die dem Stern abgewandte Seite ab.⁷⁶ Ein anderes (praktischeres) Konzept besteht in mehreren Schalen, die jeweils nur einen Teil der Sternstrahlung abfangen. Auf diese Weise kann die Dyson-Sphäre so gestaltet werden, dass existierende Planeten nicht beeinflusst werden – insbesondere solche, die, wie die Erde, ein empfindliches Ökosystem beherbergen.

Dyson verstand sein Konzept als ein Mittel, um eine fortgeschrittene *biologische* Zivilisation mit Raum und Energie zu versorgen, doch es könnte ebenso die Basis für stellare Computer sein. Dyson-Sphären können die Sonne umlaufen, ohne einen Schatten auf die Erde zu werfen. Dyson dachte an intelligente biologische Wesen, die in den Schalen leben, doch da sich unsere Zivilisation seit Entdeckung der Rechentechnik schnell in Richtung nichtbiologischer Intelligenz bewegt, gibt es keinen Grund eine solche Sphäre mit biologischen Menschen zu besiedeln.

Dysons Konzept lässt sich noch weiter verfeinern: Weiter außen befindliche Schalen könnten die von den inneren Schalen abgegebene Wärme auffangen. Computerwissenschaftler Robert Bradbury weist darauf hin, dass beliebig viele Schichten möglich sind, und beschreibt einen Computer, bestehend aus einer Reihe verschachtelter Sternsphären, den er treffend als „Matrjoschka-Hirn“ betitelt. Uranos ist der Name eines entsprechenden von Sandberg analysierten Konzeptentwurfs. Uranos hätte mit 10^{24} Kilogramm – etwa 1 Prozent der Masse des Sonnensystems (ohne Wasserstoff, Helium und die Sonne) – etwas weniger Masse als Zeus.⁷⁷ Uranos hätte etwas 10^{39} Rechenknoten, eine geschätzte Rechenleistung von 10^{51} cps und eine Speicherkapazität von etwa 10^{52} Bits.

Berechnung ist bereits eine stark verteilte – eher denn eine zentralisierte – Ressource, und ich rechne damit, dass der Trend weiter in Richtung Dezentralisierung geht. Doch wenn sich unsere Zivilisation den Obergrenzen der Berechnungsdichte annähert, wird die Verteilung von Rechenressourcen ungefähr den eben besprochenen Konzepten entsprechen. Durch das Matroschka-Hirn beispielsweise könnten Sonnenenergie und Abwärme optimal genutzt werden. Übrigens erreichen wir die Rechenkapazität dieser stellaren Computersysteme meinen Hochrechnungen in **Kapitel 2** zufolge gegen Ende dieses Jahrhunderts.

Größer oder kleiner. Die mutmaßliche Obergrenze für die Rechenkapazität unseres Sonnensystems erreichen wir nach meinen Hochrechnungen im frühen zweiundzwanzigsten Jahrhundert. Die Geschichte zeigt, dass die Rechnertechnik sowohl nach innen als auch nach außen wächst. Über die letzten Jahrzehnte konnten wir alle zwei Jahre die Anzahl von Rechenkomponenten (Transistoren) pro Computerchip verdoppeln – dies ist Wachstum nach innen (steigende Berechnungsdichte pro Kilogramm Materie). Wachstum nach außen findet statt, indem die Anzahl an Computerchips (momentan) jährlich um etwa 8,3 Prozent steigt.⁷⁸ Wir dürfen annehmen, dass sich das Wachstum in beide Richtungen fortsetzt und das äußere Wachstum deutlich zunimmt, wenn wir uns (mit dreidimensionalen Chips) den Grenzen des inneren Wachstums nähern.

Wenn wir schließlich an die Grenzen der Rechenkapazität der gesamten Energie und Materie unseres Sonnensystems stoßen, wird uns nichts anderes übrig bleiben, als weiter nach außen – jenseits unseres Sonnensystems – zu wachsen. Ich habe zuvor auf die spekulative Möglichkeit von Berechnung im noch kleineren Maßstab subatomarer Partikel verwiesen. Piko- und Femtotechnik würde das innere Wachstum verlängern und ein weiteres Schrumpfen von Strukturgrößen ermöglichen. Doch selbst wenn dies theoretisch möglich sein sollte, dürfte Berechnung unterhalb des Nanobereichs mit großen technischen Herausforderungen verbunden sein – der Wachstumsdruck nach außen bleibt also in jedem Fall bestehen.

Expansion jenseits des Sonnensystems. Wie schnell werden wir uns ausbreiten, wenn wir beginnen die Grenzen unseres Sonnensystems zu überschreiten? Unsere Expansion wird nicht mit maximaler Geschwindigkeit beginnen, doch sie wird sehr schnell ein Tempo erreichen, das nur minimal unter der Maximalgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit oder schneller) liegt. Kritiker haben dem widersprochen, mit dem Argument, es sei schwierig Menschen (oder andere intelligente Wesen) und Ausrüstung mit Lichtgeschwindigkeit zu transportieren, ohne sie zu zerquetschen. Dies ließe sich umgehen, indem man nur langsam beschleunigt, es bleibt dann das Problem der Kollision mit interstellarem Treibgut. Doch dieser Einwand berücksichtigt nicht die Natur der Intelligenz auf diesem Entwicklungsstand. Vorstellungen von der Ausbreitung außerirdischer Intelligenz in Galaxie und Universum basieren häufig auf den Migrations- und Kolonialisierungsvorgängen der menschlichen Geschichte. Nach solchen Vorstellungen werden menschliche Siedler (oder andere intelligente Wesen, im Falle außerirdischer Zivilisationen) in andere Sonnensysteme entsandt, wo sie sich biologisch reproduzieren und von dort aus auf dieselbe Weise weiterverbreiten.

Doch wie wir gesehen haben, wird noch in diesem Jahrhundert nichtbiologische Intelligenz auf der Erde viele Billionen Male größer sein als biologische Intelligenz – es würde also keinen Sinn machen, biologische Menschen auf eine solche Mission zu schicken. Dasselbe gilt für jede andere intelligente Zivilisation. Gemeint sind wohlgerne nicht von Menschen geschickte Robotersonden: Die menschliche Zivilisation wird in jeder relevanten Hinsicht nichtbiologisch sein.

Diese nichtbiologischen Boten müssten nicht sonderlich groß sein und würden hauptsächlich aus Informationen bestehen. Allerdings reicht es nicht aus, *ausschließlich* Informationen zu versenden – eine materielle Komponente, die in anderen Sonnen- und Planetensystemen physischen Einfluss ausüben kann, ist unerlässlich. Es würde jedoch reichen, zu diesem Zweck selbstreplizierende Nanobots zu verschicken. (Nanobots funktionieren zwar im Nanobereich, ihre Gesamtgröße bemisst sich jedoch in Mikrometern).⁷⁹

Wir könnten Schwärme aus vielen Billionen von Nanobots senden: „Keimzellen“, die in anderen Planetensystemen Fuß fassen, die nötigen Materialien (Kohlenstoff und andere Elemente) finden, um sich zu replizieren, und sich dann vielfach kopieren.

Die nötigen Informationen zur Optimierung der Intelligenz solcher Nanobotkolonien könnten dann in Form von Energie – frei von Materie – in Lichtgeschwindigkeit übertragen werden. Anders als Menschen könnten solche Nanobots, da sie extrem klein sind, annähernd mit Lichtgeschwindigkeit reisen. Eine andere Möglichkeit wäre, auf Informationsübertragungen völlig zu verzichten und die nötigen Informationen direkt ins Gedächtnis der Nanobots zu schreiben. Doch solche Entscheidungen können wir getrost den Supertechnikern der Zukunft überlassen.

Die Software könnte über Milliarden von Geräten verteilt sein. Sobald einige wenige davon „Fuß gefasst“ und sich am Zielort vervielfacht haben, könnten sie in der Nähe befindliche Nanobots einsammeln, sodass andere, in dieselbe Richtung entsandte Nanobots nicht einfach weiterfliegen. Auf diese Weise kann die junge Kolonie die Informationen und Rechenressourcen sammeln, die sie zur Optimierung ihrer Intelligenz benötigt.

Ein zweiter Blick auf die Lichtgeschwindigkeit. Auf diese Weise wäre die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Intelligenz unseres Sonnensystems (das heißt, einer Typ II Zivilisation) nahe an der Lichtgeschwindigkeit. Diese ist nach unserem heutigen Verständnis die Obergrenze für die Übertragungsgeschwindigkeit von Information und materiellen Objekten – doch es gibt zumindest einige Hinweise, dass die Lichtgeschwindigkeit kein absolutes Limit darstellt.

Wir haben die Möglichkeit, die Lichtgeschwindigkeit zu umgehen, als spekulativ eingestuft, und meine Hochrechnungen beruhen nicht auf derlei Annahmen. Für das Tempo, in dem unsere Intelligenz den Rest des Universums kolonialisieren kann, ist diese Frage natürlich von entscheidender Wichtigkeit.

In Experimenten hat man Photonen aufgrund ihrer Positionsunschärfe mit fast doppelter Lichtgeschwindigkeit gemessen.⁸⁰ In diesem Zusammenhang ist dieses Ergebnis jedoch nicht relevant, da sie nicht wirklich zu einer Informationsübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit führen – und uns interessiert vor allem Kommunikationsgeschwindigkeit.

Eine andere mögliche Form von Fernübertragung, die deutlich schneller ist als Licht, ist der Zerfall von Quantenverschränkungen. Zwei gemeinsam erzeugte Teilchen können „verschränkt“ sein, das heißt, eine bestimmte Eigenschaft dieser Teilchen (beispielsweise der Spin) ist zunächst nicht determiniert und wird sich für beide Teilchen zu genau demselben Zeitpunkt entscheiden. In anderen Worten, durch die Messung der undeterminierten Eigenschaft des einen Teilchens wird zugleich auch die Eigenschaft des anderen Teilchens festgelegt, selbst wenn es mittlerweile weit entfernt ist. Scheinbar findet irgendeine Art von Kommunikation zwischen den beiden Teilchen statt.

Für den Zerfall von Quantenverschränkungen wurde ein Vielfaches der Lichtgeschwindigkeit gemessen, das heißt, die Zustandsänderung des einen Teilchens wird auf das andere mit einem Bruchteil der Zeit übertragen, die es dauern würde, Informationen in Lichtgeschwindigkeit zwischen den Teilchen zu übertragen. (Theoretisch ist die Übertragungszeit gleich null). Dr. Nicolas Gisin (Universität Genf) hat quantenverschränkte Photonenpaare per Faseroptik in entgegengesetzte Richtungen quer durch Genf geschickt. In einem Abstand von etwa elf Kilometern trafen die beiden Teilchen jeweils auf eine Glasplatte und mussten „entscheiden“, ob sie die Platte durchdringen oder abprallen – was sich in Experimenten ohne Verschränkung als völlig zufällig erwiesen hat. Aufgrund ihrer Verschränkung trafen die beiden Photonen jedoch immer dieselbe Entscheidung. Zahlreiche Versuchsdurchläufe lieferten stets dasselbe Ergebnis.⁸¹

Dieses Experiment schließt noch nicht völlig aus, dass es eine versteckte Variable gibt – das heißt, eine nicht messbare Eigenschaft, die zwischen beiden Teilchen abgestimmt ist und dafür sorgt, dass sich beide Teilchen bei einer Messung (zum Beispiel bei der Entscheidung, ob sie von einer Glasplatte abprallen oder nicht) gleich verhalten. Die „Entscheidung“ hängt

dann vom identischen Zustand der versteckten Variablen ab, anstatt von einer wirklichen Kommunikation der beiden Teilchen. Die meisten Quantenphysiker lehnen diese Interpretation jedoch ab.

Selbst wenn wir diese Versuchsergebnisse dahingehend interpretieren, dass eine quantenphysische Verbindung zwischen den beiden Teilchen besteht, so wird bei ihrer mutmaßlichen Kommunikation mit Überlichtgeschwindigkeit nichts weiter als Zufälligkeit übertragen (abgründtiefe, quantenmechanische Zufälligkeit), keine vorbestimmten Informationen, wie etwa die Bits einer Datei. Die Kommunikation zufälliger quantenmechanischer Entscheidungen über räumliche Distanzen könnte jedoch beispielsweise für Verschlüsselung von Wert sein. An zwei Orten könnte dieselbe Zufallssequenz erzeugt werden, die dann auf der einen Seite zum Kodieren und auf der anderen zum Entschlüsseln benutzt wird. Niemand könnte die geheime Verschlüsselungssequenz abhören, ohne die Quantenverschränkung zu zerstören. Es gibt bereits erste kommerzielle Produkte, die dieses Prinzip nutzen. Dieser Anwendung der Quantenmechanik könnte noch große Bedeutung zukommen, da eine andere Anwendung der Quantenmechanik – Quantencomputer – möglicherweise bisherige Verschlüsselungsstandards, die auf Faktorzerlegung großer Zahlen basieren, außer Kraft setzen könnten.

Ein weiteres Phänomen dieser Art ist die Geschwindigkeit, mit der sich Galaxien voneinander entfernen. Ist der Abstand zweier Galaxien größer als die sogenannte Hubble-Distanz, so entfernen sie sich voneinander mit Überlichtgeschwindigkeit.⁸² Dies ist kein Widerspruch zu Einsteins spezieller Relativitätstheorie, da die Geschwindigkeit durch die Ausdehnung des Raumes selbst und nicht durch die Bewegung der Galaxien im Raum zustande kommt. Doch auch das hilft uns nicht dabei, Informationen schneller als das Licht zu übertragen.

Wurmlöcher. Es gibt zwei spekulative Ideen, wie sich die Beschränkung der Lichtgeschwindigkeit umgehen lässt. Die erste wäre, Wurmlöcher – Faltungen des Universums jenseits der drei sichtbaren Dimensionen – auszunutzen. Hier geht es nicht wirklich um Fortbewegung mit Überlichtgeschwindigkeit, sondern lediglich darum, dass die Topologie des

Universums mehr ist als der simple, dreidimensionale Raum der klassischen Physik. Wenn es aber genügend Wurmlöcher und Falten im Universum gibt, könnten wir durch sie vielleicht dennoch schnell überall hin gelangen.

Einstein und Nathan Rosen formulierten 1935 die sogenannten „Einstein-Rosen-Brücken“, um Elektronen und andere Teilchen mit winzigen Raum-Zeit-Tunneln zu erklären.⁸³ Der Physiker John Wheeler führte die Bezeichnung „Wurmlöcher“ für diese Tunnel ein.⁸⁴ Wheeler zeigte, dass Wurmlöcher konsistent mit der allgemeinen Relativitätstheorie sind, welche den Raum als (in einer anderen Dimension) gekrümmt beschreibt.

Michael Morris, Kip Thorne und Uri Yurtsever (Physiker des California Institute of Technology) haben 1988 im Ansatz erklärt, wie solche Wurmlöcher künstlich erzeugt werden könnten.⁸⁵ Auf Anfrage von Carl Sagan beschrieben sie den Energieaufwand, der nötig wäre, um unterschiedlich große Wurmlöcher offen zu halten. Sie wiesen außerdem darauf hin, dass im leeren Raum aufgrund von Quantenfluktuationen fortwährend winzige Wurmlöcher (von der Größe subatomarer Partikel) entstehen. Durch Zuführung von Energie und Erfüllung weiterer Erfordernisse der Quantenphysik und der allgemeinen Relativität (zwei Felder, die seit jeher schwer vereinbar sind) könnten diese Wurmlöcher erweitert werden, sodass auch größere Objekte als subatomare Partikel hindurchpassen. Menschen hindurchzuschicken wäre zwar nicht unmöglich, aber äußerst schwierig. Doch wie gesagt würde es genügen, Nanobots und Informationen zu senden, weshalb ein Wurmloch von einigen Mikrometern ausreichend wäre.

Thorne und seine Doktoranden Morris und Yurtsever beschrieben eine Methode – konsistent sowohl mit der Quantenmechanik als auch mit der allgemeinen Relativität – um Wurmlöcher zu erzeugen, die von der Erde zu weit entlegenen Orten führen. Hierzu würde ein spontan entstandenes Wurmloch von subatomarer Größe durch Energiezufuhr erweitert und dann durch supraleitende Kugeln in seinen beiden „Eingängen“ stabilisiert. Nun kann einer der Eingänge an einen anderen Ort transportiert werden und dabei mit dem anderen Eingang, welcher auf der Erde bleibt, verbunden werden.

Thorne beschreibt ein Szenario, in dem ein Wurmloch-Eingang durch ein kleines Raumschiff zum fünfundzwanzig Lichtjahre entfernten Stern Vega transportiert wird. Wenn sich das Raumschiff beinahe mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, so wäre die Reise – vom Raumschiff aus gemessen – relativ kurz. Wäre die Reisegeschwindigkeit beispielsweise 99,995 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, so würden an Bord des Raumschiffs bis zur Ankunft gerade einmal drei Monate verstreichen. Obwohl auf der Erde während dessen etwa fünfundzwanzig Jahre vergingen, bliebe eine direkte Verbindung zwischen den räumlichen und zeitlichen Positionen der Wurmloch-Eingänge bestehen. Darum würde es selbst von der Erde betrachtet nur drei Monate dauern, um die Verbindung zu Vega herzustellen. Mit einigen technischen Verbesserungen ließen sich auf diese Weise Brücken an Orte im ganzen Universum schlagen. Durch Fortbewegung nahe der Lichtgeschwindigkeit könnten wir in relativ kurzer Zeit Kommunikations- und Transportverbindungen zu den entlegensten Winkeln des Universums herstellen – selbst zu Orten, die Millionen von Milliarden von Lichtjahren entfernt sind.

Matt Visser (Washington University in St. Louis) hat einige Verfeinerungen des Morris-Thorne-Yurtsever-Konzepts vorgeschlagen, welche die Stabilität von Wurmlöchern erhöhen und damit vielleicht sogar Menschen die Reise durch diese ermöglichen könnten.⁸⁶ Meiner Ansicht nach ist das aber gar nicht nötig. Zu dem Zeitpunkt, an dem die technischen Möglichkeiten für solche Projekte real gegeben sind, wird menschliche Intelligenz längst überwiegend nichtbiologisch sein. Es wird völlig ausreichend und sehr viel einfacher sein, molekulare selbstreplizierende Technik und Software zu entsenden. Anders Sandberg schätzt, dass durch ein Wurmloch sage und schreibe 10^{69} Bits pro Sekunde übertragen werden können.⁸⁷

Der Physiker David Hochberg und Thomas Kephart von der Vanderbilt University haben aufgezeigt, dass die Gravitation kurz nach dem Urknall stark genug war, um große Mengen selbststabilisierender Wurmlöcher entstehen zu lassen.⁸⁸ Viele dieser Wurmlöcher existieren vermutlich immer noch und sind vielleicht über das ganze Universum verteilt – möglicherweise besteht also ein weitläufiges Netz von Transportkanälen

kreuz und quer durchs Weltall. Es könnte einfacher sein, diese natürlichen Wurmlöcher zu nutzen, als neue zu erzeugen.

Die Lichtgeschwindigkeit verändern. Die zweite Spekulation ist, dass sich die Lichtgeschwindigkeit selbst verändern lässt. In **Kapitel 3** erwähnte ich Funde, die darauf hindeuten, dass sich die Lichtgeschwindigkeit in den letzten zwei Milliarden Jahren um einen Anteil von $4,5 \text{ aus } 10^8$ verändert hat.

Astronom John Webb stellte 2001 bei der Untersuchung von Licht aus achtundsechzig Quasaren (sehr hellen, jungen Galaxien) Abweichungen der sogenannten Feinstrukturkonstante fest.⁸⁹ Die Feinstrukturkonstante umfasst vier Konstanten, eine davon ist die Lichtgeschwindigkeit. Webbs Ergebnis ist also ein weiteres Indiz dafür, dass sich die Lichtgeschwindigkeit im Universum unter bestimmten Umständen verändert. John Barrow und seine Kollegen (Cambridge University) versuchen gerade in einem Experiment mit zweijähriger Laufzeit eine geringfügige Änderung der Lichtgeschwindigkeit zu bewirken.⁹⁰

Hinweise auf Veränderlichkeit der Lichtgeschwindigkeit stehen im Einklang mit neueren Theorien, nach denen die Lichtgeschwindigkeit während der Inflation (Phase rascher Expansion des jungen Universums) deutlich höher war. Experimente, die auf eine Veränderlichkeit der Lichtgeschwindigkeit hindeuten, müssen erst bestätigt werden, und zeigen lediglich minimale Veränderungen. Diese Funde wären aber – sollten sie sich wirklich bestätigen – von weitreichender Bedeutung, denn unsere Ingenieure haben die Angewohnheit, winzige Anomalien herauszugreifen und zu maximaler Entfaltung zu bringen. Die Frage ist – man kann es nicht genug betonen – nicht, ob unsere heutige Wissenschaft diese technischen Heldentaten vollbringen kann, sondern ob eine zukünftige menschliche Zivilisation mit trillionenfach erweiterter Intelligenz dazu fähig ist.

Soweit lässt sich sagen, dass hoch entwickelte Formen von Intelligenz sich irgendwann mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, und dass es, sollte die Lichtgeschwindigkeit – trotz gegenteiliger Hinweise – ein absolutes Maximum darstellen, möglicherweise dennoch möglich ist, entlegene Orte sehr schnell durch Wurmlöcher zu erreichen.

Ein zweiter Blick auf das Fermi-Paradoxon. Biologische Evolution braucht Millionen oder Milliarden von Jahren. Wenn es also andere Zivilisationen dort draußen gibt, so erstreckt sich ihre Entwicklung über eine lange Zeitspanne. Der SETI-Annahme zufolge sollte es (im ganzen Universum) Milliarden von außerirdischen Zivilisationen geben – und folglich auch Milliarden von Zivilisationen, die uns in der technischen Entwicklung weit voraus sind. Nur wenige Jahrhunderte verstreichen aber zwischen der Entwicklung von Berechnungstechnik und der Ausbreitung einer solchen Zivilisation mindestens mit Lichtgeschwindigkeit. Wie kann es also sein, dass wir noch keinerlei Kontakt hatten?

Ich bin zum Schluss gekommen, dass es diese Zivilisationen wahrscheinlich (wenn auch nicht mit Sicherheit) *überhaupt nicht gibt*. Wir sind, anders gesagt, in Führung! Ganz recht: unsere bescheidene Zivilisation mit ihren Autos, Imbissbuden und ständigen Kriegen (und Computern!) ist der universale Spitzenreiter in Sachen Komplexität und Ordnung.

Wie ist das möglich? Ist das nicht extrem unwahrscheinlich angesichts der schieren Anzahl potenziell bewohnter Planeten? Es ist in der Tat sehr unwahrscheinlich – ebenso unwahrscheinlich wie die Existenz eines Universums mit physikalischen Gesetzen und Naturkonstanten, die genau so beschaffen sind, dass sie die Evolution von Leben ermöglichen. Doch wäre das Universum nicht so beschaffen, dann gäbe es keine Evolution und wir kämen nie dazu, uns darüber zu wundern – das Anthropische Prinzip. Und doch sind wir hier. Nach einem ähnlichen Anthropischen Prinzip haben wir die Führung im Universum inne – wäre dem nicht so, würden wir uns jetzt nicht darüber wundern.

Betrachten wir die Gegenargumente.

Möglicherweise gibt es extrem hoch entwickelte Zivilisationen, die sich jedoch außerhalb unseres Lichtkegels befinden, das heißt, sie haben uns noch nicht erreicht. Okay – in diesem Fall wird SETI weiterhin nichts zu hören oder sehen bekommen, es sei denn, wir (oder die entfernten Zivilisationen) finden einen Weg, den Lichtkegel durch Manipulation der Lichtgeschwindigkeit oder durch Abkürzungen zu überwinden.

Vielleicht sind sie auch längst hier, haben aber beschlossen für uns unsichtbar zu bleiben. Träfen sie eine solche Entscheidung, so wären sie auch in der Lage diese umzusetzen, doch ist es, wie gesagt, unwahrscheinlich, dass alle außerirdischen Zivilisationen gleichermaßen diesen Entschluss gefasst haben.

John Smart hat ein „Transzendenz“-Szenario vorgeschlagen, in dem Zivilisationen, die ihre nähere räumliche Umgebung durch ihre Intelligenz gesättigt haben, ein neues Universum erschaffen (welches uneingeschränktes exponentielles Wachstum von Intelligenz und Komplexität erlaubt) und sich aus unserem Universum zurückziehen.⁹¹ Diese Option, so Smarts Hypothese, ist so attraktiv, dass sich alle intelligenten Zivilisationen ab einer gewissen Entwicklungsstufe dafür entscheiden – was das Fermi-Paradoxon erklären würde.

Science-Fiction mit riesigen Raumschiffen voller glibberiger Kreaturen erschien mir schon immer unrealistisch. Nach Seth Shostak ist „der wahrscheinliche Fall der, dass es sich bei einer außerirdischen Intelligenz, auf die wir stoßen, um Maschinenintelligenz handeln wird, und nicht um biologische Intelligenz wie die unsere.“ Nach meiner Ansicht geht es dabei nicht um Maschinen, die von biologischen Lebewesen ausgesendet wurden (so wie wir das heute tun). Vielmehr ist jede Zivilisation, die entwickelt genug ist, um die Reise hierher zu unternehmen, längst mir ihrer Technik verschmolzen, und hat es daher nicht nötig, sperrige Lebewesen und Ausrüstungen zu verschicken.

Warum sollten Außerirdische hierher kommen, falls sie existieren? Möglicherweise um uns zu beobachten – aus Neugierde (so wie wir irdische Tierarten beobachten). Oder um Materie und Energie für die Erweiterung ihrer Intelligenz zu erschließen. Die nötige Intelligenz und Ausrüstung für solche Erkundungen und Expansionen (durch Außerirdische oder durch uns, wenn wir soweit sind) wären äußerst kompakt und bestünde lediglich in Nanobots und Informationsübertragungen.

Wie es aussieht, wurde unser Sonnensystem noch nicht von anderen zum Computer gemacht. Und sollte eine fremde Zivilisation sich entschlossen haben, uns aus wissenschaftlichen Zwecken zu beobachten und sich nicht zu erkennen geben, so wird SETI sie auch nicht ausmachen können, denn

eine so fortschrittliche Zivilisation würde über Mittel und Wege verfügen, verborgen zu bleiben – schließlich wäre sie ungleich intelligenter als wir. Möglichweise wird sie sich zu erkennen geben, wenn wir die nächste Evolutionsstufe erreicht haben und unsere biologischen Gehirne mit unserer Technik vereinen. Es scheint jedoch unwahrscheinlich, dass die Milliarden von hoch entwickelten Zivilisationen, die es laut der SETI-Annahme gibt, allesamt beschlossen haben, uns nicht in die Quere zu kommen.

Ein zweiter Blick auf das Anthropische Prinzip. Das Anthropische Prinzip lässt sich zweifach anwenden: auf die bemerkenswert lebensfreundlichen Gesetze des Universums einerseits sowie auf die konkrete irdische Biologie andererseits.

Werfen wir zunächst einen Blick auf das Anthropische Prinzip hinsichtlich des Universums. Die Frage lautet hier, wieso die Naturkonstanten exakt so beschaffen sind, dass sie eine Komplexitätszunahme ermöglichen. Hätte das Plancksche Wirkungsquantum und die vielen anderen Konstanten der Physik einen ein klein wenig anderen Betrag, so wären Atome, Moleküle, Sterne, Planeten, Organismen und Menschen nicht möglich. Das Universum scheint genau die richtigen Regeln und Konstanten für uns zu haben. (Dies erinnert an Steven Wolframs Beobachtung, dass in manchen zellulären Automaten (siehe Seite 85ff.) komplexe und unvorhersehbare Muster entstehen, während andere Regeln zu uninteressanten Ergebnissen führen, beispielsweise zu gestrichelten Linien und sich wiederholenden, einfachen Dreieckstrukturen).

Wie erklären wir uns also die bemerkenswerte Beschaffenheit der Gesetze und Konstanten der Materie und Energie unseres Universums, welche die Komplexitätszunahme durch biologische und technische Evolution möglich machen? Freeman Dyson meinte einmal, dass das Universum „irgendwie mit uns gerechnet hat“. Der Komplexitätstheoretiker James Gardner stellt die Frage folgendermaßen:

Für Physiker besteht das Ziel der Physik darin, den Ablauf von Experimenten vorherzusagen, und sie glauben, dass die Stringtheorie oder M-Theorie das kann. [...] Doch sie haben keine Ahnung, [...] wieso das Universum unserem Standardmodell entspricht und dessen über 40 Parameter eben die von uns beobachteten Werte haben. Wie kann man glauben, dass ein

solches Durcheinander die einzige Voraussage der Stringtheorie ist? Ich finde es erstaunlich, dass manche Leute so engstirnig sind, sich nur auf den jetzigen Zustand des Universums konzentrieren zu können, ohne sich zu fragen, wie es dazu gekommen ist.⁹²

Die Verwunderung über die „Lebensfreundlichkeit“ des Universums führte zu diversen Formulierungen des Anthropischen Prinzips. Die „schwache“ Version des Anthropischen Prinzips besagt lediglich, dass wir uns nicht über das Universum wundern könnten, wenn es nicht genau so wäre, wie es ist. Nur in einem Universum, das zunehmende Komplexität ermöglicht, konnten Menschen entstehen und diese Fragen stellen. Anderen Versionen des Anthropischen Prinzips zufolge kann das allein nicht die Erklärung sein. Vertreter dieser Versionen wollen sich nicht mit einem glücklichen Zufall zufriedengeben. Dies gibt der kreationistischen Behauptung Raum, gerade hierin bestünde der Gottesbeweis, den die Wissenschaft immer gefordert hat.

Das Multiversum. Es gibt auch darwinistischere Ansätze für ein starkes Anthropisches Prinzip. Mathematische Gleichungen können mehrere richtige Lösungen haben. Lösen wir beispielsweise die Gleichung $x^2 = 4$ nach x auf, so erhalten wir entweder $x = 2$ oder $x = -2$. In der Gleichung $(a - b) \times x = 0$ kann x jeden beliebigen Wert annehmen, falls $a = b$ (da jede Zahl mit Null multipliziert Null ergibt). Nun ist es so, dass auch die Gleichungen der Stringtheorie unendlich viele verschiedene Lösungen haben. (Streng genommen ist die Anzahl möglicher Lösungen nicht unendlich, sondern nur sehr groß, weil die räumliche und zeitliche Auflösung des Universums durch das Plancksche Wirkungsquantum begrenzt ist). Nach der Stringtheorie könnten die Naturkonstanten daher viele verschiedene Werte haben.

Daraus folgt die Idee vom Multiversum: Vielleicht ist unser Universum nur eines von vielen Universen – in jedem davon können der Stringtheorie zufolge andere Naturkonstanten herrschen.

Evolution von Universen. Leonard Susskind (Entdecker der Stringtheorie) und Lee Smolin (theoretischer Physiker und Experte der Quantengravitation) haben die Vermutung aufgestellt, dass aus dem Universum weitere Universen entstehen und die Naturkonstanten in einem

evolutionären Prozess optimiert werden. In anderen Worten: Vielleicht ist die Tatsache, dass die Regeln und Konstanten unseres Universums so günstig für die Entwicklung von intelligentem Leben sind, kein Zufall, sondern das Ergebnis einer Evolution.

Nach Smolins Theorie werden neue Universen bei der Entstehung von Schwarzen Löchern erzeugt. Universen, in denen die meisten Schwarzen Löcher entstehen, reproduzieren sich somit am häufigsten. Der beste Weg um Schwarze Löcher zu erzeugen, so Smolin, ist die Entwicklung höherer Komplexität – also biologischen Lebens. „Reproduktion durch Schwarze Löcher führt zu einem Multiversum, in welchem günstige Bedingungen für Leben herrschen – hauptsächlich, weil lebensfreundliche Bedingungen, etwa große Kohlenstoffvorkommen, auch die Entstehung von Sternen begünstigen, die schwer genug sind, um zu Schwarzen Löchern zu werden.“⁹³ Susskinds Hypothese unterscheidet sich in einigen Details von Smolins Vermutungen, doch sie basiert ebenfalls auf Schwarzen Löchern sowie auf der „Inflation“: der Kraft, welche die rasche Ausdehnung des jungen Universums bewirkte.

Intelligenz als Schicksal des Universums. In *The Age of Spiritual Machines* habe ich eine ähnliche Idee vorgestellt – nämlich, dass Intelligenz eines Tages das Universum vollständig durchdringen und das kosmische Schicksal bestimmen wird:

Wie wichtig ist die Rolle der Intelligenz in unserem Universum? [...] Der allgemeinen Ansicht nach *nicht besonders*. Sterne entstehen und vergehen; Galaxien durchlaufen ihren Zyklus der Entstehung und Zerstörung; das Universum selbst entstand mit einem großen Knall und wird mit einem Krachen oder einem Hauchen enden – wir wissen noch nicht genau mit was von beiden. Intelligenz hat damit jedoch reichlich wenig zu tun. Intelligenz ist nicht mehr als etwas Gischt, ein Aufschäumen kleiner Kreaturen, die aus dem Wirken unerbittlicher Universalkräfte hervor- und wieder zurückschnellen. Der stumpfsinnige Mechanismus des Universums wird einer fernen Zukunft entgegen auf- beziehungsweise abgespult, und Intelligenz kann daran nichts ändern.

Das ist die allgemeine Ansicht. Meine ist eine andere. Meine Vermutung ist, dass Intelligenz sich letztendlich als mächtiger erweisen wird als diese großen, gleichgültigen Kräfte. [...]

Wird also das Universum mit einem großen Krachen oder mit einer unendlichen Expansion toter Sterne oder sonstwie enden? Meiner Ansicht nach ist hier nicht die Masse des Universums entscheidend, oder die mögliche Existenz von Antigravitation oder Einsteins sogenannter kosmologischer Konstante. Vielmehr ist das Schicksal des Universums eine

Entscheidung, die erst noch getroffen werden muss, eine Entscheidung, mit der wir uns befassen werden, wenn die Zeit reif ist.⁹⁴

Komplexitätstheoretiker James Gardner hat meine Gedanken über die Ausbreitung der Intelligenz im Universum mit der von Smolin und Susskind vorgeschlagenen Evolution von Universen kombiniert. Gardners Idee ist, dass die Reproduktion von Universen von der Evolution von Intelligenz abhängt.⁹⁵ Gardner stützt sich auf Martin Rees' Beobachtung, dass „das, was wir Naturkonstanten nennen – jene Zahlen, welche die Physik bestimmen – möglicherweise sekundäre Konsequenzen der ultimativen Theorie sind, und nicht deren tiefste, fundamentalste Grundlage darstellen“. Für Smolin ist es ein bloßer Zufall, dass Schwarze Löcher und biologisches Leben ähnliche Voraussetzungen benötigen (beispielsweise große Mengen an Kohlenstoff). Seiner Ansicht nach spielt Intelligenz keine explizite Rolle, sondern ist nur ein Nebeneffekt bestimmter lebensfreundlicher Bedingungen. Für Gardner dagegen erzeugt intelligentes Leben die Nachkommen des Universums.

Gardner schreibt: „Wir und andere Lebewesen im Kosmos sind Teil einer großen, noch unentdeckten transterrestrischen Gemeinschaft von Lebens- und Intelligenzformen, die über Milliarden von Galaxien und unzählige Parsec verteilt sind – mit einer Mission von wahrlich kosmischer Bedeutung. In der biokosmischen Vision haben wir und diese Gemeinschaft ein gemeinsames Schicksal: die Zukunft des Universums zu bestimmen und es von einer Ansammlung lebloser Atome in ein riesiges, transzendentes Bewusstsein zu verwandeln.“ Die Gesetze der Physik und ihre genau ausbalancierten Konstanten sind für Gardner „das kosmische Pendant zur DNS: Sie liefern das ‚Rezept‘, durch welches der evolvierende Kosmos in der Lage ist, Leben und immer höhere Intelligenz hervorzubringen“.

Gardners Ansicht, dass Intelligenz das wichtigste Phänomen im Universum ist, passt zu meinem eigenen Standpunkt. Ich habe jedoch Einwände bezüglich der „großen, [...] transterrestrischen Gemeinschaft von Lebens- und Intelligenzformen, die über Milliarden von Galaxien [...] verteilt sind“. Es gibt keinerlei Hinweise auf die Existenz einer solchen Gemeinschaft jenseits der Erde. Jene entscheidende Gemeinschaft könnte allein in unserer eigenen, bescheidenen Zivilisation bestehe. Zwar sind, wie

zuvor beschrieben, alle möglichen Gründe denkbar, warum uns eventuelle intelligente Zivilisationen verborgen bleiben (beispielsweise Selbstzerstörung, absichtliches Verstecken oder Kommunikation *komplett* ohne elektromagnetische Übertragung), doch ist es wenig glaubhaft, dass jede einzelne der (nach der SETI-Annahme existierenden) Milliarden von Zivilisationen da draußen einen solchen Grund hat.

Die ultimative Fitnessfunktion. Susskinds und Smolins Idee, dass Schwarze Löcher die Fitnessfunktion (die zu optimierende Eigenschaft in einem Evolutionsprozess) für die Universen des Multiversums darstellen, lässt sich vereinen mit Gardners und meiner Auffassung, Intelligenz sei jene Fitnessfunktion. Wie in **Kapitel 3** erläutert ist die Rechenleistung eines Computers das Produkt seiner Masse und seiner Effizienz. Ein Stein hat, wie wir uns erinnern, eine gehörige Masse, aber eine extrem geringe Effizienz (das heißt, das Verhalten seiner Teilchen ist größtenteils zufällig). Die meisten Interaktionen der Teilchen in einem Menschen sind ebenfalls zufällig, doch auf einem logarithmischen Maßstab befindet sich der Mensch etwa auf halbem Weg zwischen dem Stein und dem ultimativen Laptop.

Ein Computer wie der ultimative Laptop hat eine extrem hohe Effizienz. Wenn einmal optimale Effizienz erreicht ist, so kann die Leistung eines Computers nur noch durch Vergrößerung seiner Masse erhöht werden. Wird die Masse des Computers groß genug, so werden die Gravitationskräfte so stark, dass er zu einem Schwarzen Loch kollabiert – somit kann ein Schwarzes Loch als ultimativer Computer betrachtet werden.

Natürlich nicht jedes Schwarze Loch. In den meisten Schwarzen Löchern laufen, wie in den meisten Steinen, haufenweise zufällige Transaktionen ab, jedoch keine sinnvollen Berechnungen. Ein gut organisiertes Schwarzes Loch wäre jedoch, in cps pro Liter gemessen, der mächtigste Computer, den man sich vorstellen kann.

Hawking-Strahlung. Lange wurde debattiert, ob es möglich ist, Informationen in ein Schwarzes Loch zu übertragen, in sinnvoller Weise zu manipulieren und zurückzuholen. Stephen Hawking zufolge kommen Übertragungen aus einem Schwarzen Loch durch Teilchen-Antiteilchen-

Paare zustande, welche spontan in Nähe des Ereignishorizontes entstehen (dem „Point of no Return“ – Punkt ohne Wiederkehr – eines Schwarzen Lochs, jenseits dessen Energie und Materie nicht mehr entfliehen können). Zu spontanen Entstehungen von Teilchen-Antiteilchen-Paaren kommt es ständig und überall im Weltall; Teilchen und Antiteilchen fliegen dabei in entgegengesetzte Richtungen davon. Wenn sich eines von beiden in den Ereignishorizont bewegt, so entfernt sich das andere vom Schwarzen Loch.

Manche dieser Teilchen haben genug Energie um der Gravitation zu entfliehen, wodurch die sogenannte Hawking-Strahlung entsteht.⁹⁶ Vormalig dachte man, Schwarze Löcher wären tatsächlich vollkommen schwarz; Hawking aber zeigte, dass sie kontinuierlich energiegeladene Teilchen abstrahlen. Hawking zufolge ist diese Strahlung jedoch rein zufällig, ein Ergebnis zufälliger quantenmechanischer Vorgänge am Ereignishorizont. Ein Schwarzes Loch mag also einen ultimativen Computer enthalten, der von Hawkings ursprünglich vertretenen Ansicht nach sind jedoch alle Informationen in einem Schwarzen Loch für immer gefangen, der Computer könnte uns demnach also nie seine Rechenergebnisse mitteilen.

1997 schlossen Hawking und Kip Thorne (der Wurmloch-Theoretiker) eine Wette mit John Preskill (California Institute of Technology) ab. Hawking und Thorne wetteten, dass alle Informationen, die von einem Schwarzen Loch geschluckt werden, verloren seien, und dass alle Berechnungen, die in einem Schwarzen Loch stattfinden, ob sinnvoll oder nicht, niemals nach außen gelangen können. Preskill hingegen wettete, dass Informationen aus Schwarzen Löchern zurückgeholt werden können.⁹⁷ Wetteinsatz waren irgendwelche nützlichen Informationen in Form einer Enzyklopädie.

In den Folgejahren rückte der Konsens der Fachwelt zunehmend von Hawkings Meinung ab. Am 21. Juli 2004 gestand dieser seine Niederlage ein und gab zu, dass Preskill recht gehabt hatte: Informationen, die in ein Schwarzes Loch wandern, sind nicht verloren. Sie können dort theoretisch umgewandelt und wieder zurückübertragen werden – und zwar anhand von Quantenverschränkungen zwischen den abgestrahlten Teilchen und ihren Antiteilchen, die in das Schwarze Loch fliegen. Wird der Zustand eines Antiteilchens im Inneren des Schwarzen Lochs durch sinnvolle

Berechnungen beeinflusst, so kann dieses Resultat anhand des Zustands des außen befindlichen, verschränkten Teilchens abgelesen werden.

Pflichtbewusst ließ Hawking Preskill ein Cricket-Lexikon zukommen, welches dieser zurückwies – Preskill forderte stattdessen ein Baseball-Lexikon, welches Hawking einmal für einen Festvortrag überflogen hatte.

Angenommen Hawkings neue Ansicht ist korrekt, so wäre der ultimative Computer ein Schwarzes Loch. Die Optimierung von Intelligenz im Universum würde demnach zur Vermehrung der Anzahl an Schwarzen Löchern führen. Susskind und Smolin verwiesen lediglich darauf, dass Biologie und Schwarze Löcher ähnliche Materialvoraussetzungen haben: Ein auf Schwarze Löcher optimiertes Universum sei auch für die Entwicklung von Intelligenz optimal. Betrachten wir Schwarze Löcher jedoch als die ultimative Form intelligenter Berechnung, so kommen wir zu dem Schluss, dass die beiden vorgeschlagenen Fitnessfunktionen – Optimierung von Intelligenz beziehungsweise der Anzahl Schwarzer Löcher – äquivalent sind.

Warum Intelligenz mächtiger ist als Physik. Es gibt einen weiteren Grund für das Anthropische Prinzip. Es mag extrem unwahrscheinlich anmuten, dass wir im Universum führend sind, was technische Entwicklung betrifft, doch nach dem bereits erwähnten schwachen anthropischen Prinzip könnten wir diese Diskussion nicht führen, wenn wir uns nicht entwickelt hätten.

Indem Intelligenz alle verfügbare Energie und Materie erfasst, wird dumme Materie zu schlauer Materie. Auch schlaue Materie wird zwar streng genommen den Gesetzen der Physik unterworfen sein, durch ihre außerordentliche Intelligenz wird sie jedoch diese Gesetze bis ins letzte Detail zu ihren Zwecken zu nutzen verstehen. Darum scheint Intelligenz mächtiger zu sein als Physik. Präziser wäre es vielleicht zu sagen, dass Intelligenz mächtiger ist als Kosmologie: Wenn Materie zu schlauer Materie wird (das heißt, mit Intelligenz gesättigt ist), kann sie andere Materie und Energie (vermöge entsprechend mächtiger Technik) nach ihrem Willen manipulieren. Dies wird in Diskussionen über die Zukunft des

Kosmos zumeist nicht bedacht – es wird angenommen, Intelligenz sei irrelevant für Ereignisse kosmischen Ausmaßes.

Sobald ein Planet eine Technik schaffende Spezies hervorbringt, und diese Spezies Computertechnik entwickelt (wie auf der Erde geschehen), ist es nur eine Frage weniger Jahrhunderte, bevor ihre Intelligenz die Materie und Energie in der näheren Umgebung gesättigt hat und beginnt, sich mindestens mit Lichtgeschwindigkeit (und eventuell schneller) auszubreiten. Eine solche Zivilisation wird schließlich (durch ihre hervorragende Technik) die Gravitation und andere kosmische Kräfte überwinden – oder, genauer gesagt, völlig ihrer Kontrolle unterwerfen – und das Universum nach ihrem Willen gestalten. Dies ist das Ziel der Singularität.

Das ganze Universum als Computer. Wie lange wird es dauern, bis die Intelligenz unserer Zivilisation das Universum erfüllt? Seth Lloyd schätzt, dass es etwa 10^{80} Teilchen im Universum gibt, mit einer theoretischen maximalen Rechenkapazität von 10^{90} . In anderen Worten: Ein Computer, der so groß wie das Universum ist, könnte mit 10^{90} cps rechnen.⁹⁸ Um zu diesen Schätzungen zu gelangen, berechnete Lloyd anhand der beobachteten Energiedichte (etwa ein Wasserstoffatom pro Kubikmeter) die Summe aller Energie im Universum. Teilt man diesen Wert durch das Plancksche Wirkungsquantum, so kommt man auf 10^{90} cps. Das Universum ist etwa 10^{17} Sekunden alt, somit haben bislang maximal 10^{107} Berechnungen stattgefunden. Da jedes Teilchen mit seinen sämtlichen Freiheitsgraden (einschließlich Position, Bewegungsrichtung, Spin und so weiter) etwa 10^{10} Bits darstellt, repräsentiert der Zustand des Universums zu jedem Zeitpunkt etwa 10^{90} Bits an Information.

Wir müssen nicht davon ausgehen, dass wirklich die komplette Masse und Energie in Berechnungsprozesse einbezogen wird. Wenn wir uns mit 0,01 Prozent begnügen, so bleibt immer noch ein Potenzial von etwa 10^{86} cps. Nach unserem heutigen Wissen können wir uns diesen Obergrenzen lediglich annähern. Intelligenz von einer solchen Größenordnung wird in der Lage sein, ihre technischen Kunststücke durchzuführen, ohne natürliche Prozesse zu stören, welche sie für schützenswert hält.

Das holografische Universum. Eine andere Betrachtung der maximalen Rechen- und Speicherkapazität des Universums ergibt sich aus einer neuen, spekulativen Theorie über die Natur von Information. Dem „Holografischen Prinzip“ zufolge ist das Universum eigentlich eine zweidimensionale Informations-Oberfläche, seine dreidimensionale Gestalt nur Illusion.⁹⁹ Das Universum ist demnach ein gigantisches Hologramm.

Die Informationen, so die Theorie, sind im feinen Maßstab des Planckschen Wirkungsquantums aufgetragen. Die maximale Informationsmenge im Universum ist folglich seine Oberfläche geteilt durch das Quadrat der Planck-Konstante: etwa 10^{120} Bits. Das Universum scheint nicht genug Materie zu enthalten, um eine solche Informationsmenge zu kodieren – die theoretische maximale Kapazität des holografischen Universums ist also möglicherweise höher als die praktische. Die Größenordnungen der Größenordnungen der verschiedenen Schätzungen bewegen sich jedoch etwa im selben Bereich. Die Anzahl an Bits, die ein für sinnvolle Berechnungen umfunktioniertes Universum verarbeiten kann, liegt bei 10 hoch irgendetwas zwischen 80 und 120.

Unsere Technik wird dieses Maximum – auch in Zukunft – wahrscheinlich nicht erreichen können. In **Kapitel 2** habe ich gezeigt, wie wir uns im Verlauf des zwanzigsten Jahrhunderts von 10^{-5} cps auf 10^8 cps pro tausend Dollar gesteigert haben. Anhand der kontinuierlichen, doppelt exponentiellen Wachstumskurve des zwanzigsten Jahrhunderts habe ich hochgerechnet, dass wir 2100 etwa 10^{60} cps pro tausend Dollar erreichen werden. Wenn wir annehmen, dass eine Billion Dollar für Berechnung ausgegeben wird, so sind wir zum Ende des Jahrhunderts bei 10^{69} cps. Dafür reicht die Materie und Energie in unserem Sonnensystem.

Um in die Nähe von 10^{90} cps zu kommen, müssen wir uns über das restliche Universum ausbreiten. Die Fortsetzung der doppelt exponentiellen Wachstumskurve zeigt, dass unsere Intelligenz gegen Ende des zweiundzwanzigsten Jahrhunderts das komplette Universum sättigen könnte, *vorausgesetzt*, dass wir nicht auf die Lichtgeschwindigkeit beschränkt sind. Selbst die Obergrenze gemäß dem Holografischen Prinzip erreichen wir – in der Hochrechnung – vor Ende des zweiundzwanzigsten Jahrhunderts.

Sollte es überhaupt irgendwie möglich sein, die Begrenzung durch die Lichtgeschwindigkeit zu überwinden, so wird unsere auf den Umfang unseres Sonnensystems ausgedehnte Intelligenz die nötige Technik dafür entwickeln können. Wenn ich wetten müsste, so würde ich darauf setzen, dass es möglich ist, die Lichtgeschwindigkeit zu umgehen, und dass es uns in den nächsten Jahrhunderten gelingen wird. Doch das sind meine persönlichen Hirngespinnste – noch reicht unser Wissen nicht aus, um hierüber sichere Aussagen zu treffen. Wenn die Lichtgeschwindigkeit tatsächlich eine unüberwindbare Barriere darstellt und Wurmlöcher auch keine Abkürzung ermöglichen, so wird es nicht Hunderte, sondern Milliarden von Jahren dauern, bis unsere Intelligenz das Universum erfüllt; und außerdem sind wir in diesem Fall auf unseren Lichtkegel im Universum beschränkt. In jedem Falle wird das exponentielle Wachstum unserer Berechnungen im Verlauf des zweiundzwanzigsten Jahrhunderts an eine Grenze stoßen – die Frage ist nur, an was für eine.

Der große Unterschied dieser beiden Zeitspannen – einige Jahrhunderte gegenüber Milliarden von Jahren (um das Universum mit Intelligenz zu erfüllen) – zeigt, weshalb das Thema Lichtgeschwindigkeit so große Bedeutung hat und im zweiundzwanzigsten Jahrhundert ein zentraler Forschungsgegenstand unserer Zivilisation sein wird. Daher glaube ich, dass wir hoch motiviert sein werden, physikalische Schlupflöcher zu finden und sie – falls es sie denn gibt – auszunutzen.

Falls es möglich ist, neue Universen zu erschaffen und mit ihnen in Kontakt zu treten, so tun sich damit weitere Möglichkeiten für die Ausweitung intelligenter Zivilisationen auf. Gardners Ansicht ist, dass die Intelligenz im Universum die physikalischen Gesetze und Konstanten neu entstehender Universen beeinflusst. Doch möglicherweise gibt es direktere Wege für intelligente Zivilisationen, ihre Intelligenz auf andere Universen zu übertragen. Die Idee, dass wir uns über dieses Universum hinaus ausbreiten könnten, ist natürlich höchst spekulativ – keine der bisherigen Multiversum-Theorien erlaubt eine Kommunikation zwischen Universen, abgesehen von der Vererbung von Naturgesetzen und -konstanten.

Wenn wir auf das uns bekannte Universum beschränkt sind, so ist unser ultimatives Schicksal, dessen Energie und Materie vollständig mit unserer

Intelligenz zu sättigen. Wie das Universum dann wohl aussehen mag? Wir können nur abwarten.

MOLLY 2004: *Und was macht das Universum, wenn es Epoche sechs erreicht? [Das Stadium, in welchem der nichtbiologische Teil unserer Intelligenz das Universum erobert].*

CHARLES DARWIN: *Das ist schwer zu beantworten. Das ist, wie wir schon sagten, als würden sich Bakterien fragen, was ein Mensch wohl machen wird.*

MOLLY 2004: *Für die Wesen in Epoche sechs sind biologische Menschen also wie Bakterien?*

GEORGE 2048: *Also ich betrachte dich bestimmt nicht als Bakterie.*

MOLLY 2104: *Du kannst das gar nicht wissen, George – du bist erst Epoche fünf.*

CHARLES: *Um auf die Bakterien zurückzukommen, ich glaube, wenn sie sprechen könnten...*

MOLLY 2004: *Und denken!*

CHARLES: *Klar, sprechen und denken – dann würden sie also vermutlich sagen, dass Menschen wohl dasselbe tun werden, wie Bakterien, nämlich essen, Gefahren vermeiden und sich vermehren.*

MOLLY 2104: *Aber wir vermehren uns auf viel interessantere Weise.*

MOLLY 2004: *Also, genau genommen ist vor allem unsere präsingularitäre Reproduktion interessant. Eure virtuelle Reproduktion hat ja nichts mehr mit Sex zu tun – genau wie bei Bakterien.*

MOLLY 2104: *Wir haben Sexualität von Reproduktion getrennt, das stimmt, aber das ist ja auch im Jahr 2004 nichts Neues. Außerdem können wir uns, im Gegensatz zu Bakterien, jederzeit verändern.*

MOLLY 2004: *Also habt ihr eigentlich auch Veränderung und Evolution von Reproduktion abgekoppelt.*

MOLLY 2104: *Auch das gilt auch schon für 2004.*

MOLLY 2004: *Okay, okay. Aber was deine Liste betrifft, Charles: Wir Menschen haben auch Dinge wie Kunst und Musik – das unterscheidet uns doch irgendwo von anderen Tieren.*

GEORGE 2048: *Absolut, Molly. Und genau darum geht es in der Singularität. Die Singularität ist die lieblichste Musik, die wundervollste Kunst, die schönste Mathematik...*

MOLLY 2004: *Verstehe. Die Musik und Kunst der Singularität verhält sich dann wohl zu der heutigen, wie unsere Musik und Kunst zu...*

NEDD LUDD: *...der Kunst und Musik von Bakterien.*

MOLLY 2004: *Also, was Bakterien manchmal in meinem Kühlschrank veranstalten, könnte teilweise schon als Kunst durchgehen.*

NED: *Und hast du ihre Kunst gewürdigt?*

MOLLY 2004: *Nein. Weggewischt, ehrlich gesagt.*

NED: *Da hast du's.*

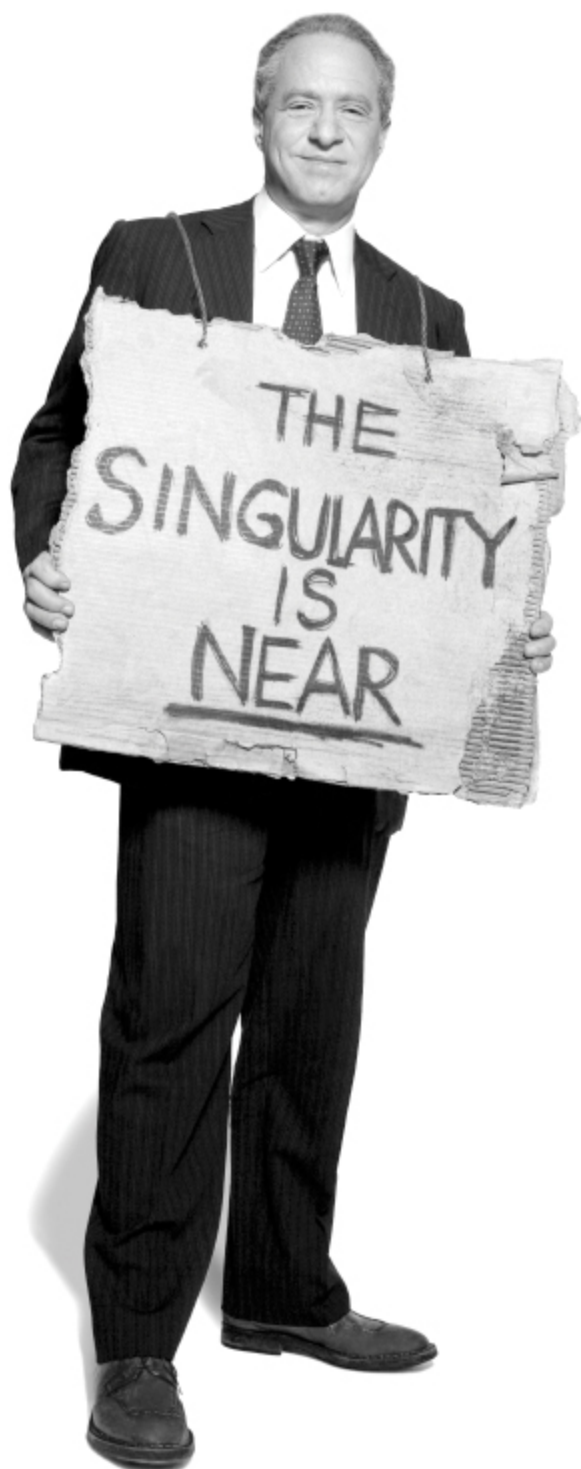
MOLLY 2004: *Ich versuche immer noch mir auszumalen, was in Epoche sechs passiert.*

TIMOTHY LEARY: *Das Universum wird fliegen wie ein Vogel!*

MOLLY 2004: *Aber wohin fliegt es? Ich meine, es ist das All.*

TIMOTHY: *Das ist als würde man fragen: Wie klingt das Klatschen einer einzelnen Hand?*

MOLLY 2004: *Aha, offensichtlich wussten also schon die Zen-Meister über die Singularität Bescheid.*



KAPITEL 7

Ich bin ein Singularitarist*

Die meistbegangene Torheit ist, zu glauben, was offensichtlich unwahr ist.

H. L. MENCKEN

In Jahrhunderte alten Traditionen verwurzelte Lebensphilosophien beinhalten viel Wissen über persönliches, organisiertes und gesellschaftliches Leben. Für viele von uns haben diese Traditionen auch Mängel. Wie könnten sie nicht auch den einen oder anderen Irrtum enthalten, wo sie doch vorwissenschaftlichen Zeiten entstammen? Außerdem haben antike Lebensphilosophien wenig bis gar nichts zu jenen zentralen Themen zu sagen, mit denen wir uns konfrontiert sehen, wenn moderne Technik uns erlaubt, unsere Identität als Menschen und Individuen zu verändern, und wenn wirtschaftliche, kulturelle und politische Kräfte die globalen Verhältnisse verändern.

MAX MORE, „PRINCIPLES OF EXTROPY“

Die Welt braucht kein weiteres totalistisches Dogma.

MAX MORE, „PRINCIPLES OF EXTROPY“

Ja, wir haben eine Seele. Aber sie besteht aus einem Haufen winziger Roboter.

GIULIO GIORELLI

Das Substrat ist moralisch irrelevant, vorausgesetzt es beeinflusst nicht Funktionalität oder Bewusstsein. Von einem moralischen Standpunkt ist es egal, ob jemandes Neuronen aus Silizium oder biologisch sind (ebenso egal wie die Farbe seiner Haut). Aus denselben Gründen, aus denen wir Rassismus oder Speziesismus ablehnen, sollten wir auch Kohlenstoffchauvinismus, oder *Bioismus*, ablehnen.

NICK BOSTROM, „ETHICS FOR INTELLIGENT MACHINES: A PROPOSAL 2001“

Schon vor Langem stellten Philosophen fest, dass Kinder in eine komplexere Welt geboren werden als ihre Vorfahren. Dieses frühe und vielleicht unbewusste Erkennen der beschleunigenden Veränderungen war möglicherweise ein Katalysator für einen großen Teil des utopistischen, apokalyptischen und millenaristischen Denkens in unserer westlichen Tradition. Der Unterschied heute ist, dass *jeder* irgendwo den Fortschritt erkennt, nicht nur die Visionäre.

JOHN SMART

Ein Singularitarist ist jemand, der die Singularität verstanden und über ihre Auswirkungen auf sein eigenes Leben nachgedacht hat.

Ich mache mir seit Jahrzehnten solche Gedanken. Selbstredend kommt dieser Prozess niemals zu einem Abschluss. Ich geriet bereits als Teenager in den 1960ern ins Grübeln über die Beziehung unseres Denkens zu unserer Rechentechnik. In den 1970ern begann ich mich mit der Beschleunigung von technischer Entwicklung zu befassen und Ende der 1980er schrieb ich mein erstes Buch darüber. Somit hatte ich eine Menge Zeit darüber nachzudenken, wie sich die verschiedenen bevorstehenden Umwälzungen auf die Gesellschaft – und auf mich selbst – auswirken werden.

George Gilder bezeichnete meine wissenschaftlichen und philosophischen Überzeugungen als „Ersatzvision für Leute, die den Glauben an traditionelle religiöse Inhalte verloren haben“.¹ Gilders Aussage ist verständlich, da es zumindest scheinbare Ähnlichkeiten zwischen der Singularität und den Heilsversprechungen traditioneller Religionen gibt.

Doch meine Ansichten sind nicht das Ergebnis einer Suche nach einem Religionsersatz. Meine Bemühungen, technische Entwicklungen zu verstehen, hatte zunächst rein praktische Gründe: Ich versuchte, das richtige Timing für meine Erfindungen zu finden und optimale Entscheidungen bei der Gründung von Technikunternehmen zu treffen. Mit der Zeit entwickelten meine technologischen Modellierungen ein Eigenleben und ich formulierte eine Theorie der technischen Evolution. Von da war es nicht mehr weit zu den Überlegungen über die Folgen der bevorstehenden technischen Veränderungen für Gesellschaft, Kultur und mein eigenes Leben. Singularitarist wird man also nicht durch Glauben, sondern durch Verständnis. Wenn man über die in diesem Buch besprochenen technischen Trends nachdenkt, so ergeben sich neue Perspektiven auf die Themen, womit die traditionellen Religionen sich zu befassen versuchten: Sterblichkeit und Unsterblichkeit, der Sinn unseres Lebens und die Intelligenz des Universums.

Als Singularitarist fühlte ich mich oft ausgesondert und einsam, da die meisten anderen Menschen meine Ansichten nicht teilen. Den meisten „großen Denkern“ ist dieser große Gedanke völlig fremd. In zahllosen Aussagen der Menschen äußert sich immer wieder die Volksweisheit, das menschliche Leben sei kurz, unser physischer und intellektueller Horizont begrenzt, und zu unseren Lebzeiten gebe es keine fundamentalen Veränderungen. Ich gehe davon aus, dass die Menschen von dieser kurzsichtigen Denkweise abrücken, wenn die Auswirkungen des immer schnelleren Fortschritts ersichtlicher

werden – einer der Hauptgründe, dieses Buch zu schreiben, war jedoch, mehr Menschen von meinen Ansichten zu überzeugen.

Wie denken wir also über die Singularität nach? Wie bei der Sonne ist es besser, nicht direkt hineinzublicken, sondern sie aus dem Augenwinkel zu beobachten. Wie Max More sagte, ist das Letzte, was wir brauchen, ein weiteres Dogma. Wir brauchen keinen weiteren Kult; Singularitarismus ist kein Glaubenssystem mit einheitlichen Positionen. Singularitarismus bedeutet einerseits ein Verstehen grundlegender technischer Triebkräfte und andererseits eine Einsicht, die einen alles überdenken lässt, von Gesundheit und Wohlstand bis zur Natur des Todes selbst.

Ein Singularitarist zu sein hat viele Konsequenzen für mich, das Folgende ist eine kleine Auswahl davon. Es handelt sich dabei um meine persönliche Philosophie, nicht um einen Vorschlag für eine neue Doktrin.

- Wir haben heute die Chance lange genug zu leben um ewig zu leben.² Durch aggressive Anwendung unseres jetzigen Wissens können Alterungsprozesse stark verlangsamt werden, sodass wir fit bleiben, bis bessere Methoden zur Lebensverlängerung durch Bio- und Nanotechnik verfügbar werden. Die meisten Baby-Boomer werden es jedoch nicht schaffen, da sie sich der beschleunigenden Alterungsprozesse ihrer Körper sowie den Möglichkeiten, ihnen Einhalt zu gebieten, nicht bewusst sind.
- Aus diesem Grund setze ich alles daran, meine eigene Biochemie zu reprogrammieren, und habe sie bereits vollkommen verändert.³ Ergänzungsmittel und Medikamente sind nicht der letzte Ausweg für den Fall, dass irgendwann etwas schief läuft. Denn schon von Anfang läuft etwas schief: Unsere Körper werden durch ein überholtes genetisches Programm aus lange vergangenen Zeiten gesteuert. Dieses genetische Erbe gilt es zu überwinden – und in ersten Ansätzen haben wir auch das Wissen dafür.
- Mein Körper ist temporär. Seine Bestandteile werden monatlich fast vollständig ausgetauscht. Nur das Muster meines Körpers und Gehirns hat Bestand.
- Wir sollten danach streben, diese Muster zu verbessern, indem wir die Gesundheit unseres Körpers optimieren und unseren Geist erweitern. Letztendlich werden wir unsere geistigen Fähigkeiten durch Verschmelzung mit unserer Technik uferlos ausdehnen.

- Technik allein kann die Probleme beheben, mit denen menschliche Gesellschaften seit Generationen zu kämpfen haben. Neue Techniken werden beispielsweise ermöglichen, Energie sauber zu erzeugen und zu speichern, Schadstoffe und Erreger aus unseren Körpern und der Umwelt zu entfernen, und sie schaffen das Wissen und den Wohlstand, um Hunger und Armut zu beseitigen.
- Wissen jeglicher Form ist wertvoll: Musik, Kunst, Wissenschaft, Technik, und ebenso das Wissen in unseren Körpern und Gehirnen. Jeder Verlust von Wissen ist tragisch.
- Information ist Wissen. Die Welt strotzt vor Information; die Rolle unserer Intelligenz ist es, die besten Informationsmuster zu finden und herauszufiltern. Beispielsweise liefern unsere Sinne einen ständigen Informationsfluss von mehreren Hundert Megabits pro Sekunde – der größte Teil davon wird verworfen; nur die wichtigsten Erkenntnisse und Einsichten werden registriert. Intelligenz verwirft also selektiv Informationen, um Wissen zu schaffen.
- Der Tod ist eine Tragödie. Eine Person kann, ohne Abschätzigkeit, als komplexes Muster (eine Form von Wissen) betrachtet werden, das verloren geht, wenn der Mensch stirbt – zumindest ist das heute der Fall, da wir noch keine Möglichkeit haben, auf dieses Wissen zuzugreifen und Sicherungskopien zu erstellen. Wenn Leute davon sprechen, dass sie mit dem Tod eines geliebten Menschen einen Teil von sich selbst verloren haben, so ist das im wörtlichen Sinne wahr, da sie die neuronalen Muster, die ihr Gehirn entwickelt hat, um mit der nun verschiedenen Person zu interagieren, nicht mehr benutzen können.
- Eine primäre Funktion von Religion ist die Rationalisierung des Todes – das heißt, den Tod als eine gute Sache darzustellen. Mit Malcolm Muggeridges Worten: „Ohne den Tod wäre das Leben unerträglich.“ Doch die Explosion von Kunst, Wissenschaft und anderen Formen von Wissen, welche die Singularität mit sich bringen wird, wird das Leben mehr als erträglich machen und ihm wahre Bedeutung geben.
- Meiner Ansicht nach besteht der Sinn des Lebens an sich – und der Sinn unseres Lebens – darin, ein immer größeres Wissen schätzen zu lernen und sich zu einer höheren „Ordnung“ hin zu bewegen. Wie in **Kapitel 2** besprochen steigt mit der Ordnung meist auch die Komplexität, wobei gewisse Einsichten die Ordnung vergrößern, indem sie die Komplexität vermindern.

- So wie ich es sehe, ist der Sinn des Universums derselbe wie der Sinn unseres Lebens: das Streben nach mehr Intelligenz und Wissen. Unsere menschliche Intelligenz und Technik steht dabei an vorderster Front (denn scheinbar gibt es keine außerirdische Konkurrenz).
- Wir haben eine entscheidende Schwelle überschritten, und im Verlauf des nächsten Jahrhunderts wird es uns gelingen, das Sonnensystem mit selbstreplizierender, nichtbiologischer Intelligenz zu erfüllen.
- Ideen sind Verkörperung und Produkt von Intelligenz. Zu fast jedem Problem, dem wir begegnen, gibt es eine Idee, durch die es gelöst werden kann. Unlösbare Probleme sind solche, die wir nicht richtig formulieren können und derer wir uns häufig gar nicht bewusst sind. Bei den Problemen, denen wir begegnen, ist die Herausforderung, sie präzise in Worte (und manchmal in Gleichungen) zu fassen. Ist dies gelungen, so können wir auch Ideen finden, um diese Probleme anzugehen und zu lösen.
- Wir können uns der enormen Hebelwirkung der Beschleunigung technischer Entwicklung bedienen. Das beste Beispiel ist Lebensverlängerung durch „eine Brücke zu einer Brücke zu einer Brücke“.⁴ (Durch unser heutiges Wissen können wir die Zeit bis zur Ausreifung der Biotechnik überbrücken, welche uns wiederum bis in die Nanotechnik-Ära bringt). So können wir schon *heute* ewig leben, obwohl wir noch nicht das nötige Wissen für eine endgültige, radikale Lebensverlängerung haben. In anderen Worten: Wir müssen nicht alle Probleme sofort lösen. Wir können die technischen Möglichkeiten der Zukunft – in fünf oder zehn oder zwanzig Jahren – in unsere Pläne einbeziehen. So gehe ich bei meinen technischen Projekten vor, und auf dieselbe Weise können wir die großen Probleme der Gesellschaft und unseres eigenen Lebens angehen.

Der zeitgenössische Philosoph Max More beschreibt das Ziel der Menschheit als eine Transzendenz, die „durch Wissenschaft und Technik, gelenkt von menschlichen Werten“, erreicht wird.⁵

More zitiert Nietzsche: „Der Mensch ist ein Seil, geknüpft zwischen Tier und Übermensch – ein Seil über einem Abgrunde.“ Der heutige Mensch, so kann man Nietzsche interpretieren, hat sich bereits über andere Tiere hinaus entwickelt und strebt danach, zu etwas noch viel Größerem zu werden. Als Abgrund können wir die (im folgenden Kapitel behandelten) Gefahren der modernen Technik verstehen.

More hat auch die Besorgnis geäußert, dass das Wissen um die herannahende Singularität zu Passivität gegenüber den Problemen von heute führen könnte.⁶ Der Ausblick auf die großartige Möglichkeit, unsere uraltesten Probleme zu überwinden, könnte aktuelle Probleme banal erscheinen lassen. Ich teile Mores Vorbehalte gegen „passiven Singularitarismus“. Ein Grund zur Eigeninitiative ist die Tatsache, dass Technik stets ein zweischneidiges Schwert ist, und dass auf dem Weg zur Singularität viel schief gehen kann – mit verheerenden Konsequenzen. Selbst kleine Verzögerungen in der technischen Entwicklung können Millionen von Menschen zu Leiden und Tod verdammen. Übermäßige Regulationen bei der Einführung neuer Therapien beispielsweise kosten zahlreiche Menschenleben. (Millionen sterben täglich allein an Herzkrankheiten).

More befürchtet zudem eine kulturelle Rebellion „welche, verleitet von religiösen und kulturellen Bemühungen für ‚Stabilität‘, ‚Frieden‘ und gegen ‚Hybris‘ und ‚das Unbekannte‘, die technische Beschleunigung zum Entgleisen bringen könnte.“⁷ Meiner Ansicht nach ist eine signifikante Beeinträchtigung des technischen Fortschritts eher unwahrscheinlich. Selbst einschneidende Ereignisse wie die beiden Weltkriege (mit einer Opferzahl in der Größenordnung von einhundert Millionen Menschenleben), der Kalte Krieg und zahlreiche wirtschaftliche, kulturelle und soziale Umbrüche haben den Fortschritt nicht auch nur im geringsten bremsen können. Heute wird jedoch zunehmend eine reflexartige, undurchdachte Technophobie spürbar, die das Potenzial hat, viel Leid zu verursachen.

Posthumanität? Gelegentlich ist in Hinblick auf die Zeit nach der Singularität von einer „posthumanen“ Ära die Rede. Mensch zu sein bedeutete für mich jedoch, Teil einer Zivilisation zu sein, die danach strebt, ihre Grenzen zu überwinden. Wir erheben uns schon heute über unsere Natur, indem wir Mittel finden, sie zu reprogrammieren und zu verbessern. Wo wäre also die Grenze zu ziehen, wenn wir einen technisch veränderten Menschen nicht mehr als Menschen gelten lassen wollten? Ist jemand mit einem Herzschrittmacher noch menschlich? Und jemand mit einem Neuroimplantat? Mit zwei Neuroimplantaten? Wie sieht es aus mit Nanobots im Gehirn? Sollen wir die Grenze vielleicht auf 650 Millionen Nanobots festschreiben und sagen: Wer weniger hat, ist menschlich, wer mehr hat, ist posthuman?

Unsere Verschmelzung mit unserer Technik hat Erdrutsch-Charakter, doch wir rutschen nicht in Nietzsches Abgrund, sondern in eine vielversprechende Zukunft. Zuweilen wird diese Verschmelzung als Entstehung einer neuen „Spezies“ verstanden, doch dieser Begriff ist ein biologisches Konzept – und wir überwinden die Biologie. Die Singularität wird nicht ein weiterer Schritt der biologischen Evolution, sondern ihr endgültiger Umsturz sein.

BILL GATES: *Ich bin zu 99 Prozent einverstanden. Deine Ideen sind wissenschaftlich fundiert, das finde ich gut. Und ich bin auch optimistisch – aber dein Optimismus nimmt schon fast religiöse Züge an.*

RAY: *Nun ja, wir brauchen ohnehin eine neue Religion. Die Hauptfunktion von Religion war bisher, den Tod zu rationalisieren – etwas anderes blieb ja auch nicht übrig.*

BILL: *Und wie sähe diese neue Religion aus?*

RAY: *Sie würde zwei bestehende Prinzipien übernehmen – eines von den traditionellen Religionen, und ein säkulares Prinzip aus Kunst und Wissenschaft. Das religiöse Prinzip ist Respekt für das menschliche Bewusstsein.*

BILL: *Ah ja, die Goldene Regel.*

RAY: *Genau: Unsere Moral und Rechtsprechung beruhen auf Respekt vor dem Bewusstsein anderer. Wenn ich einen anderen Menschen verletze, so gilt das als unmoralisch und wahrscheinlich illegal, weil ich einem anderen bewussten Wesen Leid zugefügt habe. Wenn ich unbewusste Gegenstände zerstöre, ist das in der Regel okay, solange es sich um mein Eigentum handelt. Fremdes Eigentum zu beschädigen ist wiederum unmoralisch und illegal – nicht weil dem Eigentum Leid zugefügt wird, sondern seinem Besitzer.*

BILL: *Und was ist das säkulare Prinzip?*

RAY: *Die Wichtigkeit von Wissen. Wissen ist mehr als Information – es ist Information mit Bedeutung für bewusste Wesen: Musik, Kunst, Literatur, Wissenschaft, Technik. Dies sind die Qualitäten, die durch die Entwicklungen, von denen ich rede, gesteigert werden.*

BILL: *Wir müssen auf jeden Fall wegkommen von den überladenen, seltsamen Geschichten der alten Religionen und uns auf einfache Botschaften*

konzentrieren... Aber wir brauchen auch noch einen charismatischen Führer für diese neue Religion.

RAY: Charismatische Führer gehören zum alten Modell. Auch davon sollten wir wegkommen.

BILL: Okay, wie wär's mit einem charismatischen Computer?

RAY: Oder ein charismatisches Betriebssystem?

BILL: Ha, das gibt es doch schon! Hat deine Religion einen Gott?

RAY: Noch nicht, aber den wird es geben. Wenn wir die gesamte Materie und Energie des Weltalls mit unserer Intelligenz gesättigt haben, wird das Universum „erwachen“, bewusst werden – und über fantastische Intelligenz verfügen. Das kommt, denke ich, Gott schon ziemlich nahe.

BILL: Das ist aber Silizium-Intelligenz, nicht biologische Intelligenz.

RAY: Ja – biologische Intelligenz werden wir hinter uns lassen. Zunächst wird es eine Mischform geben, aber letztendlich wird unsere nichtbiologische Intelligenz maßgeblich sein. Dabei wird es sich übrigens wohl nicht um Silizium handeln, sondern um Kohlenstoffnanoröhren oder etwas in der Art.

BILL: Ich verstehe schon – ich sage nur „Silizium-Intelligenz“, damit die Leute wissen, was ich meine. Aber ich glaube nicht, dass so etwas ein menschliches Bewusstsein haben kann.

RAY: Warum nicht? Wenn wir alle Vorgänge des Körpers und des Gehirns ausreichend genau emulieren und dann auf ein anderes Medium übertragen, warum sollte dieses Medium kein Bewusstsein haben?

BILL: Oh, es hätte durchaus ein Bewusstsein. Aber ich glaube, eine andere Art von Bewusstsein.

RAY: Vielleicht liegt hier das eine Prozent, in dem wir uns nicht einig werden. Warum sollte das Bewusstsein anders sein?

BILL: Weil Computer sich im Handumdrehen zusammenschließen können. Zehn Computer – oder eine Million Computer – können sich zu einem größeren, schnelleren Computer verbinden. Als Menschen können wir das nicht. Wir sind einzelne Individuen, die sich nicht verknüpfen lassen.

RAY: Das ist nur eine Einschränkung biologischer Intelligenz. Die unvereinbare Individualität biologischer Intelligenz ist kein Vorteil. „Silizium-Intelligenz“ kann beides: Computer müssen ihre Intelligenz

und Ressourcen nicht verknüpfen – sie können auch „individuell bleiben“, wenn sie wollen. Sie können sogar beides auf einmal, gleichzeitig verknüpft und individuell sein. Wir Menschen versuchen auch mit anderen zu verschmelzen, doch unsere Verknüpfungen sind nicht sehr beständig.

BILL: Nichts von Wert ist beständig.

RAY: Ja, doch es wird ersetzt durch etwas von noch größerem Wert.

BILL: Stimmt. Darum muss die Innovation immer weiter gehen.

Die lästige Bewusstseinsfrage

Gesetzt der Fall, man könnte das Gehirn auf die Größe einer Mühle aufblasen um darin herumzugehen; man würde das Bewusstsein dennoch nicht finden.

G. W. LEIBNIZ

Wird man sich jemals an die Liebe erinnern können? Es ist, als würde man in einem Keller versuchen den Geruch von Rosen heraufzubeschwören. Man sieht vielleicht eine Rose, aber niemals ihren Duft.

ARTHUR MILLER⁸

Wer seine ersten, einfachen Versuche im Philosophieren unternimmt, verstrickt sich zumeist in die Frage, ob man wissen kann, dass man etwas weiß, und worüber man denkt, wenn man über sich selbst nachdenkt, und was es ist, das da nachdenkt. Nachdem man sich darüber lange genug das Gehirn zermartert hat, lernt man, diese Fragen nicht zu überstürzen: Der Begriff eines bewussten Wesens unterscheidet sich implizit von dem eines unbewussten Objekts. Wenn wir sagen, dass ein bewusstes Wesen etwas weiß, so heißt das nicht nur, dass es etwas weiß, sondern dass es weiß, dass es etwas weiß, und dass es weiß, dass es weiß, dass es etwas weiß, und so weiter, solange wir wollen: hier, so erkennen wir, gibt es einen Zirkelbezug, jedoch keinen der schlechten Art, da es die Fragen sind, die an Sinn verlieren, nicht die Antworten.

J. R. LUCAS, PHILOSOPH, IN SEINEM AUFSATZ „MINDS, MACHINES, AND GÖDEL“ (1961)⁹

Träume sind solange real, bis sie vorbei sind; können wir vom Leben mehr behaupten?

HAVELOCK ELLIS

Werden zukünftige Maschinen emotionale und geistige Erfahrungen erleben können? Wir haben bereits mehrere Szenarien kennengelernt, in denen nichtbiologische Intelligenz das volle Programm menschlicher Emotionen aufweist. Ende der 2020er werden wir das menschliche Gehirn komplett

erforscht haben, was uns ermöglichen wird, nichtbiologische Systeme zu erschaffen, welche dem Menschen an Komplexität und Raffinesse in nichts nachstehen – dies schließt auch emotionale Intelligenz mit ein.

In einem anderen Szenario werden die Muster eines Menschen auf ein angemessenes nichtbiologisches Denksubstrat hochgeladen. Ein drittes Szenario ist die graduelle, aber unaufhaltsame Verwandlung der Menschen selbst von biologisch zu nichtbiologisch. Diese hat in Form von Implantaten zur Linderung von Krankheiten und Behinderungen bereits begonnen. Weiter gehen wird es mit Nanobots in der Blutbahn, zunächst zu medizinischen Zwecken und um Alterung aufzuhalten. Später werden sich verbesserte Nanobots mit unseren Neuronen kurzschließen, um unsere Sinne zu erweitern, aus dem Inneren des Nervensystems heraus eine virtuelle und verbesserte Realität zu schaffen und unser Gedächtnis und andere kognitive Routinen zu unterstützen. Dann sind wir Cyborgs – und ausgehend von unserem Gehirn wird der nichtbiologische Teil unserer Intelligenz seine Fähigkeiten exponentiell erweitern. Wie in **Kapitel 2** und **3** besprochen finden wir in allen Aspekten der Informationstechnik exponentielles Wachstum vor, einschließlich bei Preis-Leistung, Kapazität und Verbreitungsgeschwindigkeit. Angesichts der äußerst geringen Menge an Masse und Energie, die pro Bit für Berechnung und Kommunikation nötig ist (siehe Kapitel 3), wird sich diese Entwicklung fortsetzen, bis der nichtbiologische Anteil unserer Intelligenz den biologischen Anteil weit übersteigt. Da die Kapazität unserer biologischen Intelligenz hingegen relativ festgelegt ist (abgesehen von geringfügigen Verbesserungen durch Biotechnik), wird letztendlich der nichtbiologische Anteil ausschlaggebend sein. Werden wir in den 2040ern, wenn unsere nichtbiologische Intelligenz milliardenfach größer ist als unsere biologische Intelligenz, unser Bewusstsein immer noch als an die letztere geknüpft verstehen?

Nichtbiologische Entitäten werden behaupten, das liegt auf der Hand, sie hätten eine emotionale und geistige Erfahrungswelt. Sie – das heißt wir – werden behaupten, menschlich zu sein und über das volle Spektrum emotionaler und geistiger Erfahrungen zu verfügen, derer Menschen sich so gerne rühmen. Und dabei wird es sich nicht um leere Behauptungen handeln, denn sie werden auch das komplexe Verhalten eines fühlenden Wesens in all seiner Vielfalt aufweisen.

Doch wird mit diesen Behauptungen und diesem Verhalten – so überzeugend sie auch sein mögen – tatsächlich das subjektive Erfahren eines nichtbiologischen Menschen einhergehen? Damit sind wir wieder bei dem äußerst realen, aber letztlich (mit objektiven Mitteln) nicht messbaren Phänomen des Bewusstseins angelangt. Oft wird von Bewusstsein gesprochen, als sei es eine offensichtliche Eigenschaft, die jederzeit erkannt und überprüft werden kann. Doch wenn wir eines über das Bewusstsein sagen können, so ist es folgendes:

Es gibt keine beweiskräftige Testmethode, um sein Vorhandensein festzustellen.

Wissenschaft beruht auf objektiven Messungen und logischen Schlüssen, und objektive Messungen sind ihrer Natur nach ungeeignet, subjektive Erfahrungen zu erfassen – lediglich Korrelationen dieser Erfahrungen sind messbar, beispielsweise Verhalten (einschließlich des „innerlichen Verhaltens“ der Komponenten eines Wesens, etwa seiner Neuronenaktivität). Diese Einschränkung liegt in den Begriffen „Subjektivität“ und „Objektivität“. Wir haben grundsätzlich keinen direkten, objektiven Zugriff auf die subjektive Erfahrung eines anderen Wesens. Wir können darüber argumentieren, zum Beispiel: „Schau dir dieses nichtbiologische Gehirn an; es macht genau dasselbe wie ein Menschenhirn.“ Oder „Siehst du, es handelt genau wie ein Mensch.“ Doch das sind und bleiben lediglich bloße Argumente. Egal wie überzeugend eine nichtbiologische Person auch sein mag, es wird immer jemanden geben, der ihr das Bewusstsein abspricht, solange sie nicht auf Neurotransmittern oder DNS basiert oder irgendeine andere typisch biologische Eigenschaft aufweist.

Wir gehen davon aus, dass andere Menschen ein Bewusstsein haben, obwohl selbst das nur eine Annahme ist. Ob nichtbiologische Entitäten, höhere Tiere beispielsweise, ein Bewusstsein haben, ist hingegen umstritten. Das zeigt sich in Debatten um Tierrechte, denn dort ist die Frage, ob Tiere bewusst handeln oder lediglich „instinktgesteuerte“ Quasi-Maschinen sind, von entscheidender Bedeutung. Dieser Thematik wird im Zusammenhang mit zukünftigen nichtbiologischen Wesen von menschenartiger Intelligenz noch viel mehr Beachtung zukommen.

Tatsächlich werden diese zukünftigen Maschinen sogar menschenartiger sein als jetzige Menschen. Das klingt zunächst paradox, doch heutiges

menschliches Denken ist zumeist banal und unoriginell. Wir bewundern, wie Einstein aus einem Gedankenexperiment heraus die allgemeine Relativitätstheorie aufstellte, oder wie Beethoven Symphonien komponierte, ohne hören zu können. Doch diese Höhepunkte menschlichen Denkens sind rar und flüchtig. (Glücklicherweise können wir Aufzeichnungen dieser flüchtigen Eingebungen erstellen – eine Fähigkeit, die uns von anderen Tieren unterscheidet). In unserer zukünftigen, vorwiegend nichtbiologischen und sehr viel intelligenteren Form werden wir von den besseren Qualitäten unseres Denkens deutlich ausgiebigeren Gebrauch machen.

Wie werden wir also damit umgehen, wenn nichtbiologische Intelligenzen anfangen zu behaupten, sie hätten ein Bewusstsein? Praktisch betrachtet wird ihre Behauptung akzeptiert werden. Zum einen wird es sich bei „ihnen“ um uns handeln, es wird also keine klare Unterscheidung zwischen biologischer und nichtbiologischer Intelligenz geben. Des Weiteren werden diese nichtbiologischen Wesen extrem intelligent sein und es daher auch schaffen, andere Menschen (biologische, nichtbiologische sowie teilweise biologische) von ihrer Bewusstheit zu überzeugen. Sie werden sämtliche emotionalen Feinheiten aufweisen, die uns heute glauben lassen, dass Menschen ein Bewusstsein haben. Sie werden andere Menschen zum Lachen und zum Weinen bringen. Doch das ist weniger ein philosophisches Argument als eine politische und psychologische Prognose.

Ich bin nicht einverstanden mit der Mutmaßung, subjektive Erfahrung sei entweder nicht existent oder eine Qualität von geringer Bedeutung, die wir problemlos ignorieren können. Die Frage, wer oder was ein Bewusstsein hat und welcher Natur die subjektiven Erfahrungen anderer sind, ist von fundamentaler Bedeutung für Ethik, Moral und Recht. Unser Justizwesen beruht zu großen Teilen auf dem Bewusstseinsbegriff und schenkt solchen Handlungen besondere Aufmerksamkeit, welche einem (bewussten) Menschen Leid – eine besonders intensive Art bewusster Erfahrung – zufügen oder das Bewusstsein eines Menschen (zum Beispiel durch Mord) beenden.

Die zwiespältige Meinung darüber, inwiefern Tiere fähig sind, Leid zu empfinden, spiegelt sich auch in der Gesetzgebung. Wir haben Gesetze gegen Tierquälerei mit besonderem Augenmerk auf intelligentere Tiere, beispielsweise Primaten. (Hier scheint es einen blinden Fleck zu geben, was

das Leiden von Tieren in Massentierhaltung betrifft, doch das ist ein anderes Thema).

Mein Punkt ist, dass wir die Bewusstseinsfrage nicht als rein philosophisches Problem abtun können – denn sie ist zentral für die rechtlichen und moralischen Grundlagen unserer Gesellschaft. Die Diskussion wird sich verändern, wenn einmal Maschinen – nichtbiologische Intelligenzen – in überzeugender Weise verlangen, dass man Rücksicht auf ihre Gefühle nimmt. Sobald sie dabei Sinn für Humor – ein wichtiges Merkmal von Menschlichkeit – beweisen, dürften sie die Debatte gewinnen.

Ich nehme an, dass entsprechende Veränderungen unseres Rechtssystems zunächst weniger durch Gesetzgebung als durch Urteilsprechung bewirkt werden, da sich Neuerungen zumeist aus konkreten Fällen heraus ergeben. Einen Vorgeschmack auf zukünftige Entwicklungen bot ein scherzhafter Antrag der Anwältin Martine Rothblatt (von der Kanzlei Mahon, Patusky, Rothblatt & Fisher) zur Verhinderung der Abschaltung eines bewussten Computers. Verhandelt wurde der Antrag in einem gespielten Verfahren in der Biocyberethik-Sitzung einer Konferenz der International Bar Association.¹⁰

Bestimmte Korrelationen subjektiver Erfahrungen können wir messen (beispielsweise objektiv feststellbare neuronale Aktivität zum Zeitpunkt einer objektiv feststellbaren Vermeldung der subjektiven Wahrnehmung eines Tons). Doch subjektive Erfahrungen an sich können wir nicht durch Messungen erschließen. Wie schon in **Kapitel 1** erwähnt, haben wir es dabei zu tun mit einer Diskrepanz zwischen „objektiver“ Erfahrung in der dritten Person, welche die Grundlage von Wissenschaft ist, und „subjektiver“ Erfahrung in der ersten Person, welche synonym mit Bewusstsein ist.

Es ist uns unmöglich, die subjektive Erfahrung anderer wirklich zu erleben. Im Jahre 2029 wird es Technik geben, durch welche das Gehirn einer Person die *Sinneswahrnehmungen* (und potenziell einige andere neuronalen Korrelationen von Emotionen und dergleichen) einer anderen Person erfahren kann. Die *interne* Erfahrung dieser anderen Person wird dabei jedoch nicht übermittelt, da ihr Gehirn anders beschaffen ist. Tagtäglich hören wir Erfahrungsberichte anderer Menschen und können dabei oft das aus den internen Zuständen dieser Menschen resultierende Verhalten nachempfinden. Da wir jedoch ausschließlich mit ihrem *Verhalten* konfrontiert sind, können wir uns ihre subjektive Erfahrung dabei lediglich *vorstellen*. Da es möglich ist,

ein völlig konsistentes wissenschaftliches Weltbild zu konstruieren, in dem Bewusstsein überhaupt nicht vorkommt, kommen manche Beobachter zu dem Schluss, es sei eine Illusion.

In seiner Abhandlung „One Half a Manifesto“ führt Jaron Lanier (ein Vorreiter auf dem Gebiet der virtuellen Realität) sechs Einwände gegen sogenannten „kybernetischen Totalismus“ an. Im dritten dieser Einwände beanstandet er die Behauptung, „dass subjektive Erfahrung entweder nicht existiert oder unwichtig ist, da sie eine Art peripheren Nebeneffekt darstellt.“¹¹ Wie zuvor erwähnt ist kein Gerät denkbar, das die Subjektivität (bewusste Erfahrung) eines Wesens definitiv nachweisen könnte. Jedes Gerät, das diesen Zweck vorgeblich erfüllt, wäre in irgendeiner Weise von philosophischen Prämissen abhängig. Zwar bin ich mit dem größten Teil von Laniers Abhandlung nicht einverstanden (siehe den Abschnitt „Software-Kritik“ in **Kapitel 9**), doch in diesem Punkt stimmen wir überein, und ich kann Laniers Frustration über das Diktat der „kybernetischen Totalisten“ – das heißt, Leuten wie mir (wobei ich die Bezeichnung ablehne) – verstehen (und nachempfinden!).¹² Ich erkenne, so wie Lanier, selbst subjektive Erfahrungen an, die Leute dazu bewegen, zu behaupten, es gäbe keine subjektiven Erfahrungen.

Eben weil wir die Bewusstseinsfrage nicht vollständig durch objektive Messungen und wissenschaftliche Analysen beantworten können, kommt der Philosophie eine entscheidende Rolle zu. Die Bewusstseinsfrage ist die wichtigste ontologische Frage. Wenn wir wirklich von einer Welt ohne subjektive Erfahrung ausgehen (einer Welt voller Dinge, die jedoch von keinem bewussten Wesen wahrgenommen werden), so könnten wir gleichwohl annehmen, dass die Welt überhaupt nicht existiert. Weltanschauungen, die eben diese Annahme machen, finden sich sowohl im Osten (in einigen Denkschulen des Buddhismus) als auch im Westen (insbesondere in bestimmten Interpretationen der Quantenmechanik).

RAY: Wir können uns darüber streiten, was für Wesen ein Bewusstsein haben oder eines erlangen können. Oder darüber, ob Bewusstsein eine emergente Eigenschaft ist, oder durch irgendeinen bestimmten – biologischen oder anderweitigen – Mechanismus hervorgerufen wird.

Doch Bewusstsein gibt uns noch ein weiteres Rätsel auf – vielleicht das wichtigste von allen.

MOLLY 2004: *Ich bin ganz Ohr.*

RAY: *Selbst wenn wir davon ausgehen, dass alle scheinbar bewussten Menschen tatsächlich bewusst sind – weshalb ist mein Bewusstsein an diese eine Person, die ich „ich“ nenne, geknüpft? Warum bin ich als gerade diese eine Person bewusst, die als Kind Tom Swift Jr. gelesen hat, Erfinder wurde und Bücher über die Zukunft schreibt? Jeden Morgen wache ich auf und mache die Erfahrung, genau diese Person zu sein. Warum bin ich nicht Alanis Morissette oder irgendjemand anderes?*

SIGMUND FREUD: *Du wärst also gerne Alanis Morissette?*

RAY: *Interessanter Einwand, aber das ist nicht der Punkt.*

MOLLY 2004: *Was ist der Punkt? Ich kapier's nicht.*

RAY: *Warum werden mir die Erfahrungen und Entscheidungen gerade dieser einen Person bewusst?*

MOLLY 2004: *Doofe Frage – weil du diese Person bist!*

SIGMUND: *Es scheint, als ob dich etwas an dir stört. Erzähl mir mehr davon.*

MOLLY 2004: *Vorhin hat er gesagt, er will nicht menschlich sein.*

RAY: *Nein, ich habe nur gesagt, dass ich die Einschränkungen, die Probleme und den Wartungsaufwand meines Körpers der Version 1.0 nicht mag. Aber das tut alles nichts zur Sache.*

CHARLES DARWIN: *Du wunderst dich, dass du du bist? Da gibt es nichts zu wundern, das ist eine Tautologie.*

RAY: *Es klingt sinnlos – wie so viele Versuche, die wahre Bewusstseinsfrage auszuformulieren. Aber ich wundere mich einfach, weshalb ich mir ununterbrochen der Erfahrungen und Gefühle dieser einen, bestimmten Person bewusst bin. Was andere Menschen betrifft, so erkenne ich ihr Bewusstsein an, erlebe jedoch nicht ihre Erfahrungen – nicht direkt zumindest.*

SIGMUND: *Okay, jetzt sehe ich etwas klarer. Du kannst also die Erfahrungen anderer nicht nachempfinden? Hattest du schon mal ein Gespräch über Mitgefühl?*

RAY: *Also, ich versuche hier, über meine ganz persönliche Bewusstseins Erfahrung zu sprechen.*

SIGMUND: *Sehr gut. Nur weiter.*

RAY: *Das ist ein gutes Beispiel für das, was fast immer passiert, wenn man versucht, einen Dialog über Bewusstsein zu führen. Die Diskussion schweift unweigerlich ab zu Psychologie, Verhalten, Intelligenz, Neurologie und so weiter. Mir geht es aber um die Frage, weshalb ich die Person bin, die ich bin.*

CHARLES: *Du erschaffst dein eigenes Selbst.*

RAY: *Das stimmt. So wie unser Gehirn unsere Gedanken formt, formen unsere Gedanken unser Gehirn.*

CHARLES: *Du hast dich also selbst erschaffen, und darum bist du, wer du bist.*

MOLLY 2104: *Im Jahr 2104 kann man das sehr direkt erfahren. Da ich nichtbiologisch bin, kann ich mich selbst jederzeit verändern. Wenn ich Lust habe, kann ich auch – davon hatten wir vorhin gesprochen – meine Denkmuster mit denen einer anderen Person kombinieren. Man wird dabei eins mit jemand anderem. Eine faszinierende Erfahrung.*

MOLLY 2004: *Nun, Fräulein Molly aus der Zukunft, das geht auch schon in unserer primitiven Zeit. Nennt sich Liebe.*

Wer bin ich? Was bin ich?

Warum bist du du?

DIESE FRAGE STECKT IN DER ABKÜRZUNG YR UU* FÜR YOUNG RELIGIOUS UNITARIAN UNIVERSALISTS, EINE ORGANISATION, IN DER ICH ANFANG DER 1960ER AKTIV WAR (DAMALS NOCH: LRY, LIBERAL RELIGIOUS YOUTH).

Das, wonach du suchst, ist der Suchende.

HEILIGER FRANZ VON ASSISI

Ich weiß nicht allzu viel
Ich weiß, was ich weiß, falls du weißt, was ich meine.
Philosophie ist der Text auf einer Cornflakes-Packung.
Religion ist das Lächeln eines Hundes. [...]
Philosophieren ist ein Gang über glitschige Felsen.
Religion ist ein Licht im Nebel. [...]
Was ich bin, ist, was ich bin.
Bist du, was du bist, oder was?

EDIE BRICKELL, „WHAT I AM“

Die Willensfreiheit ist die Fähigkeit, das freudig zu tun, was man tun muss.

CARL JUNG

Der Zufall des Quantentheoretikers ist nicht die ethische Freiheit der Augustiner.

NORBERT WIENER¹³

Gegenüber einem gewöhnlichen Tod würde ich es bevorzugen, mit ein paar Freunden bis dahin in Madeira eingelegt zu werden, um dann durch die Solarwärme meines geschätzten Landes wieder zum Leben erweckt zu werden! Aber aller Wahrscheinlichkeit nach leben wir in einem Jahrhundert, das zu wenig fortschrittlich, und dessen Wissenschaft zu jung ist, als dass wir miterleben könnten, wie eine solche Kunst zur Vollendung gebracht wird.

BENJAMIN FRANKLIN, 1773

Eine verwandte, aber andere Frage dreht sich um unsere Identität. Wir haben zuvor über die Möglichkeit gesprochen, die Muster eines individuellen Geistes – Wissen, Fähigkeiten, Persönlichkeit, Erinnerungen – in ein anderes Medium hochzuladen. Auch wenn sich diese neue Entität ganz genau wie ich verhält, bleibt die Frage: Bin das wirklich *ich*?

Einige Szenarios für radikale Lebensverlängerung sehen einen Umbau und eine Neugestaltung der Teilsysteme unserer Körper und Gehirne vor. Geht mein eigentliches Ich im Zuge dieser körperlichen Umbaumaßnahmen verloren? Diese Thematik wird sich in den nächsten Jahrzehnten von einer Jahrhunderte alten philosophischen Debatte zu einer akuten praxisrelevanten Angelegenheit wandeln.

Also, wer bin ich? Bin ich nur ein Muster, da ich mich ständig verändere? Was passiert, wenn jemand dieses Muster kopiert? Bin ich dann das Original und/oder die Kopie? Vielleicht bin ich Materie: die chaotische und zugleich geordnete Ansammlung von Molekülen, die meinen Körper und mein Gehirn bildet.

Doch diese Position hat ein Problem: Die Teilchenmenge, aus der mein Körper und mein Gehirn bestehen, ist eine komplett andere als in der Vergangenheit. Es ist erwiesen, dass fast all unsere Zellen innerhalb weniger Wochen ausgetauscht werden, und selbst unsere Nervenzellen, die relativ lange überdauern, wechseln sämtliche Moleküle, aus denen sie bestehen, innerhalb von einem Monat aus.¹⁴ Die Halbwertszeit von Mikrotubuli (Proteinfilamente, welche Neuronen ihre Struktur geben) beträgt etwa zehn

Minuten. Die Mikrofilamente in Dendriten werden etwa alle vierzig Sekunden ersetzt, die Energie liefernden Proteine einer Synapse etwa stündlich. NMDA-Rezeptoren in Synapsen gelten mit fünf Tagen schon als relativ langlebig.

Ich bin also eine komplett andere Menge von Materie als noch vor einem Monat – alles, was bleibt, ist das Organisationsmuster dieser Materie. Auch dieses Muster ändert sich, jedoch langsam und graduell. Ich bin dem Wasser ähnlich, das über einen Felsen in einem Flussbett rauscht. Jede Millisekunde bringt neue Wassermoleküle, doch das Muster, dass sie bilden, bleibt Stunden, vielleicht sogar Jahre lang dasselbe.

Vielleicht sollten wir mich also als ein beständiges Muster in Materie und Energie betrachten. Doch auch diese Definition ist problematisch, da es eines Tages möglich sein wird, dieses Muster hochzuladen und meinen Körper und mein Gehirn ausreichend genau zu replizieren – so genau, dass die Kopie vom Original nicht mehr unterscheidbar sein wird (das heißt, die Kopie wird den „Ray Kurzweil“-Turing-Test bestehen können). Diese Kopie wird also mein Muster haben. Man könnte entgegnen, dass vielleicht nicht alle Details übereinstimmen, doch mit der Zeit wird sich die Auflösung und Genauigkeit von Körperreplikaten ebenso exponentiell verbessern wie alle anderen Informationstechniken. Letztendlich werden wir also all meine neuronalen und physiologischen Details beliebig genau abbilden können.

Obwohl die Kopien dasselbe Muster aufweisen wie ich, wäre es schwierig, sie als mich zu begreifen, da ich ja – möglicherweise – auch noch da wäre. Man könnte mich sogar scannen und kopieren, während ich schlafe. Wenn man mir dann am nächsten Morgen eröffnete: „Gute Neuigkeiten, Ray, wir haben dich erfolgreich in einem langlebigeren Substrat reinstanciiert, dein alter Körper samt Gehirn wird nicht mehr benötigt“ – so wäre ich da voraussichtlich anderer Meinung.

Dieses Gedankenexperiment dürfte klar machen, dass die Kopie zwar genau wie ich handelt und aussieht, aber trotzdem nicht ich ist. Es könnte sein, dass wir nicht einmal voneinander wüssten. Sie hätte zwar alle meine Erinnerungen und würde sich daran erinnern, ich gewesen zu sein, doch ab seiner Erzeugung würde Ray 2 eigene, einzigartige Erfahrungen machen, und seine Realität würde beginnen sich von meiner zu unterscheiden.

Dies ist von praktischer Bedeutung im Zusammenhang mit Kryonik (der Konservierung eines kürzlich verstorbenen durch Einfrieren, mit dem Ziel, ihn

später zu „reanimieren“, wenn die Technik vorhanden ist, um die Schäden zu beheben, die durch den Sterbeprozess, das Einfrieren und die eigentliche Todesursache entstanden sind). Vieles deutet darauf hin, dass eine eingefrorene Person, sollte sie einmal reanimiert werden, mit neuen Materialien und neuromorph äquivalenten Systemen „reproduziert“ würde. Die reanimierte Person wäre also im Endeffekt „Ray 2“ (also jemand anderes).

Wenn wir diesen Gedanken noch etwas weiter verfolgen, stoßen wir auf das Dilemma. Wenn wir mich kopieren und das Original zerstören, so ist das mein Ende, da es sich bei der Kopie, wie wir festgestellt haben, nicht um mich handelt. Da die Kopie mich absolut überzeugend imitiert, würde niemand den Unterschied bemerken, doch es wäre nichtsdestotrotz mein Ende.

Nun betrachten wir die Situation, dass ein kleiner Teil meines Gehirns durch ein neuromorphes Äquivalent ersetzt wird.

Okay, ich bin noch da: Die Operation war erfolgreich (dank Nanobots wird irgendwann gar keine Chirurgie mehr nötig sein). Wir kennen bereits solche Menschen, beispielsweise mit Chochlea-Implantaten oder Implantaten gegen Parkinson. Nun ersetzen wir einen weiteren Teil des Gehirns. Okay, noch da... und noch einen Teil... Am Ende des Prozesses bin ich immer noch ich selbst. Es gab nie einen „alten Ray“ und einen „neuen Ray“. Ich bin derselbe wie vorher. Niemand (einschließlich mir selbst) musste mich je vermissen.

Das Ergebnis der allmählichen Ersetzung von Ray ist Ray – Bewusstsein und Identität bleiben scheinbar erhalten. Doch im Falle einer allmählichen Ersetzung gibt es kein gleichzeitiges altes und neues Ich. Am Ende des Prozesses steht das Äquivalent eines neuen Ichs (ein Ray 2), ohne dass es ein altes Ich (einen Ray 1) gibt. Allmähliche Ersetzung ist also gleichfalls mein Ende. Wir könnten uns also fragen: An welchem Punkt sind mein Körper und mein Gehirn zu einer anderen Person geworden?

Auf der anderen Seite wiederum wird meine Materie ohnehin im Rahmen natürlicher biologischer Prozesse kontinuierlich ausgetauscht (und zwar mit recht hoher Geschwindigkeit). Wie wir festgestellt haben, ist lediglich mein räumliches und zeitliches Muster in Materie und Energie von Bestand. Doch das Gedankenexperiment hat ergeben, dass eine allmähliche Ersetzung mein Ende bedeutet, selbst wenn das Muster erhalten bleibt. Werde ich also fortwährend durch eine andere Person ersetzt, die der Person, die ich ein Weilchen vorher gewesen bin, nur sehr ähnlich ist?

Nochmals: Wer bin ich? Das ist die ultimative ontologische Frage und wird oft als die Frage nach dem Bewusstsein beschrieben. Ich habe das Ganze bewusst (Wortspiel) in der ersten Person formuliert, da dies der Natur der Problematik entspricht. Es ist keine Frage in der dritten Person. Meine Frage lautet nicht „Wer sind Sie?“ – diese Frage müssen Sie sich selbst stellen.

Wenn Leute über Bewusstsein sprechen, schweifen sie gerne ab zu Überlegungen über Korrelationen des Bewusstseins in Verhalten oder Neuronenaktivität (beispielsweise, ob bestimmte Wesen zur Selbstreflexion fähig sind). Doch das sind (objektive) Überlegungen in der dritten Person und betreffen nicht das, was David Chalmers als die „schwere“ Bewusstseinsfrage bezeichnet: Wie kann Materie (unser Gehirn) etwas so scheinbar immaterielles wie das Bewusstsein hervorbringen?¹⁵

Ob ein Wesen bewusst ist oder nicht, weiß letztlich nur das Wesen selbst. Der Unterschied zwischen neuronalen Korrelationen von Bewusstheit (zum Beispiel intelligentem Verhalten) und der ontologischen Realität von Bewusstsein ist der Unterschied zwischen objektiver und subjektiver Realität. Deshalb können wir keinen objektiven Bewusstseinsdetektor bauen, ohne philosophische Grundannahmen zu machen.

Ich glaube, dass wir nichtbiologische Entitäten als bewusste Wesen akzeptieren werden, da sie irgendwann über sämtliche Eigenschaften verfügen werden, die sich bei heutigen Menschen finden und als Zeichen emotionaler und anderer subjektiver Erfahrung gelten. Doch über diese Zeichen hinaus werden wir immer noch keinen direkten Zugang zum vermuteten Bewusstsein haben.

Die meisten Menschen scheinen mir zugegebenermaßen bewusst zu sein, doch ich sollte keine voreiligen Schlüsse ziehen: Vielleicht sind sie alle Teil einer Simulation, in der ich lebe. Oder vielleicht existieren nur meine Erinnerungen, während meine erinnerten Erfahrungen niemals stattgefunden haben. Oder vielleicht habe ich nur das Gefühl, mich zu erinnern, während weder meine Erfahrungen noch meine Erinnerungen real existieren. Ich denke, das Problem wird deutlich.

Trotz dieser Dilemmata beruht meine persönliche Philosophie weiterhin auf Patternismus: Ich bin ein über die Zeit hinweg beständiges Muster. Ich bin ein sich entwickelndes Muster und ich kann die Richtung meiner Entwicklung beeinflussen. Wissen – verschieden von reiner Information – ist ein Muster,

und die Zerstörung von Wissen ist ein schwerer Verlust. Der ultimative Verlust ist somit der Verlust eines Menschen.

MOLLY 2004: *Also, ich weiß ziemlich genau, wer ich bin – ich bin mein Gehirn und mein Körper, welcher im Übrigen derzeit in Topform ist.*

RAY: *Schließt du dabei das Essen in deinem Verdauungstrakt in seinen diversen Verarbeitungsstufen mit ein?*

MOLLY 2004: *Okay, das nicht. Manches davon wird zwar ein Teil von mir, aber bis dahin hat es keine Mitgliedschaft im „Club Molly“. Ray: Wusstest du, dass 90 Prozent der Zellen in deinem Körper nicht deine DNS haben?*

MOLLY 2004: *Echt? Was für eine DNS haben sie dann?*

RAY: *Ein biologischer Mensch hat etwa zehn Billionen Zellen mit eigener DNS, aber um die einhundert Billionen Mikroorganismen im Verdauungstrakt, größtenteils Bakterien.*

MOLLY 2004: *Na großartig. Braucht man die unbedingt?*

RAY: *Sie gehören zu den Zellen, dank denen Molly wächst und gedeiht. Ohne eine gute Portion Bakterien könntest du nicht überleben. Eine gesunde Darmflora ist unentbehrlich für dein Wohlbefinden.*

MOLLY 2004: *Okay, aber ich würde sie nicht als Teil von mir zählen. Mein Wohlbefinden hängt von vielen Dingen ab, zum Beispiel von meinem Haus und meinem Auto. Aber das macht diese Dinge nicht zu einem Teil von mir.*

RAY: *Es macht schon Sinn, den Inhalt des Verdauungstrakts auszuschließen – unser Körper sieht das genau so. Unsere Gedärme befinden sich zwar in unserem Inneren, doch unser Körper behandelt ihren Inhalt als extern und kontrolliert sehr genau, was daraus ins Blut gelangt, und was nicht.*

MOLLY 2004: *Wenn ich's mir recht überlege, gefällt mir Jaron Laniers „Kreis des Empathie“ eigentlich ganz gut.*

RAY: *Inwiefern?*

MOLLY 2004: *Der Ausschnitt der Wirklichkeit, den ich als „Ich“ betrachte, ist eigentlich nicht so genau umrissen. Das ist nicht einfach mein Körper. Mit meinen Zehen zum Beispiel identifiziere ich mich nicht so stark und noch viel weniger mit meinem Darminhalt.*

RAY: *Das macht Sinn. Und selbst von den Abläufen in unserem Gehirn bekommen wir nur einen geringen Teil mit.*

MOLLY 2004: *Ja, manche Teile von meinem Gehirn scheinen jemand anderes oder woanders zu sein. Manche Gedanken und Träume scheinen aus einem fremden Ort in mein Bewusstsein zu dringen. Sie kommen natürlich aus meinem Gehirn, aber es fühlt sich nicht so an.*

RAY: *Andererseits sind uns geliebte Menschen, obwohl physisch von uns getrennt, oft so nah, dass sie ein Teil von uns zu sein scheinen.*

MOLLY 2004: *Die Grenzen meines Ichs scheinen immer mehr zu verschwimmen.*

RAY: *Warte nur, bis wir größtenteils nichtbiologisch sind. Dann werden wir unsere Gedanken und unser Denken verschmelzen, soviel wir wollen. Dann wird es noch viel schwieriger sein, klare Grenzen abzustecken.*

MOLLY 2004: *Das klingt eigentlich ganz gut. In buddhistischen Philosophien geht es viel darum, dass es letztendlich keine Grenzen zwischen uns allen gibt.*

RAY: *Hört sich an, als sei da von der Singularität die Rede.*

Die Singularität als Transzendenz

In den Augen der Moderne hat sich die Menschheit aus etwas Niederem entwickelt – das Leben beginnt als Schleim und endet in Intelligenz –, während sie traditionellen Kulturen zufolge von etwas Höherem abstammt. Der Anthropologe Marshall Sahlins drückt es so aus: „Wir sind die einzigen Leute, die glauben, dass sie von Affen abstammen. Alle anderen sind überzeugt, dass sie von Göttern abstammen.“

HUSTON SMITH¹⁶

Manche Philosophen verstehen Philosophie als das, was man mit einem Problem tut, bis es klar genug ist, um durch Wissenschaft gelöst zu werden. Andere sind der Meinung, dass ein philosophisches Problem, das wissenschaftlichen Methoden unterliegt, nie wirklich philosophisch war.

JERRY A. FODOR¹⁷

Die Singularität ist ein Ereignis, das in der materiellen Welt stattfinden wird und den unausweichlichen nächsten Schritt des Evolutionsprozesses darstellt, der mit der biologischen Evolution begann und durch die Technik von

Menschenhand fortgesetzt wurde. In ebendieser Welt der Materie und Energie können wir Transzendenz beobachten – eine Konnotation dessen, was gewöhnlich als Spiritualität bezeichnet wird. Betrachten wir nun das Wesen der Transzendenz in der physischen Welt.

Wo fangen wir an? Wie wäre es mit Wasser? Wasser ist ziemlich einfach aufgebaut, doch es manifestiert sich in vielfältigen und schönen Formen und bildet endlos variierende Muster, wenn es über Felsen spült und Wasserfälle hinabdonnert (wie zum Beispiel vor meinem Bürofenster); die bauschigen Muster der Wolken im Himmel; der Schnee auf den Berggipfeln; die faszinierenden Formen einer einzelnen Schneeflocke. Oder man denke an Einsteins Beschreibung der Verstrickung von Ordnung und Unordnung in einem Glas Wasser (in seiner Arbeit über die Brown'sche Molekularbewegung).

Oder anderswo in der Natur – da wäre zum Beispiel der komplizierte Tanz der DNS-Stränge während der Mitose. Oder die Einsamkeit eines Baumes, der sich im Wind biegt und in einem bunten Wirbel seine Blätter verliert? Oder das muntere Treiben, das uns der Blick durchs Mikroskop offenbart? Transzendenz gibt es überall.

Hier muss etwas über den Begriff „Transzendenz“ gesagt werden. „Transzendieren“ bedeutet „Übersteigen“, doch es gibt keinen Grund, dabei einen dualistischen Standpunkt einzunehmen und transzendente Realitätsebenen (beispielsweise die spirituelle Ebene) nicht als Teil dieser Welt zu betrachten. Durch die Macht der Muster können wir die Möglichkeiten „einfacher“ Materie „übersteigen“. Ich wurde zwar des Öfteren als Materialist bezeichnet, verstehe mich jedoch als ein Patternist*. Die emergente Kraft der Muster ermöglicht uns zu transzendieren. Die Materie, aus der wir bestehen, verändert sich ständig – von Bestand ist nur die transzendente Kraft unserer Muster.

Die Dauerhaftigkeit von Mustern geht über explizit selbstreplizierende Systeme (in Biologie und Technik) hinaus. Leben und Intelligenz beruhen auf dieser Dauerhaftigkeit. Das Muster ist weitaus wichtiger als das Material, aus dem es besteht.

Zufällige Pinselstriche auf einer Leinwand sind nicht mehr als Farbe. Richtig angeordnet transzendieren sie jedoch die reine Materialität und werden zu Kunst. Zufällige Noten sind nur Geräusch, in einer „inspirierten“

Komposition aber ergeben sie Musik. Ein Haufen von Bauteilen ist nicht mehr als eben das. In einer cleveren Anordnung – und vielleicht mit etwas Software (einem weiteren Muster) versehen – entstehen daraus die „Wunder“ der Technik.

Zwar betrachten manche „Spiritualität“ als die wahre Bedeutung von Transzendenz, doch Transzendenz bezieht sich auf alle Realitätsebenen: auf die Schöpfungen der Natur (einschließlich uns selbst) sowie auf unsere eigenen Kreationen in Form von Kunst, Kultur, Technik und emotionalem und spirituellem Ausdruck. Evolution dreht sich um Muster, und insbesondere die Tiefe und Ordnung dieser Muster nehmen im Verlauf eines Evolutionsprozesses zu. Die Singularität – die Vollendung unserer Evolution – wird eine Vertiefung all dieser Formen von Transzendenz bewirken.

Eine andere Konnotation des Wortes „spirituell“ ist „einen Geist habend“, also bewusst zu sein. Das Bewusstsein – der Sitz der „Personalität“ – gilt in vielen philosophischen und religiösen Traditionen als das Reale. In einer verbreiteten buddhistischen Ontologie ist subjektive – bewusste – Erfahrung die ultimative Realität, im Gegensatz zu physischen oder objektiven Erscheinungen, die als *maya* (Illusion) gelten.

Die Ausführungen über Bewusstsein in diesem Buch sollen aufzeigen, von welcher irritierender und paradoxer (und daher tiefgründiger) Natur dieser Begriff ist. Unterschiedliche Annahmen (darüber, ob eine Kopie meiner geistigen Datei auch mein Bewusstsein hat oder nicht) führen zu völlig gegensätzlichen Standpunkten.

Wir gehen davon aus, dass Menschen bewusst sind, zumindest, wenn sie sich entsprechend verhalten. Am anderen Ende des Spektrums steht die einfache Maschine, welcher wir kein Bewusstsein zusprechen. Kosmologisch betrachtet verhält sich das Universum derzeit eher wie eine einfache Maschine als wie ein bewusstes Wesen. Doch wie im vorigen Kapitel besprochen werden Intelligenz, Wissen, Kreativität, Schönheit und emotionale Intelligenz (zum Beispiel die Fähigkeit zu lieben) unserer Mensch-Maschinen-Zivilisation die Materie und Energie in unserer Umgebung erfüllen. Dann wird sich unsere Zivilisation weiter ausbreiten und sämtliche dumme Materie und Energie, die sie finden kann, in intelligente – transzendente – Materie und Energie verwandeln. In gewisser Weise könnte man sagen, dass die Singularität das Universum mit Geist erfüllen wird.

Evolution führt zu größerer Komplexität, mehr Eleganz, mehr Wissen, höherer Intelligenz, größerer Schönheit und höheren Ebenen feinsinniger Attribute, wie beispielsweise die Liebe. Alle monotheistischen Religionen beschreiben Gott durch eben diese Eigenschaften, da heißt es jedoch: unendliches Wissen, unendliche Intelligenz, unendliche Schönheit, unendliche Kreativität, unendliche Liebe und so weiter. Natürlich erreicht das beschleunigende Wachstum der Evolution niemals die Unendlichkeit, doch mit der exponentiellen Explosion bewegt es sich sehr schnell in diese Richtung. Evolution bewegt sich unaufhaltsam in Richtung des Gottesbegriffs, ohne dieses Ideal je ganz erreichen zu können. Wir können die Befreiung unseres Denkens aus den engen Banden seiner biologischen Form somit als spirituelles Unternehmen auffassen.

MOLLY 2004: *Glaubst du an Gott?*

RAY: *Nun, es ist ein Wort mit vier Buchstaben von außerordentlicher kultureller Bedeutung.*

MOLLY 2004: *Mir ist klar, dass Gott als Wort und als Idee existiert. Aber bezeichnet es für dich nicht irgendetwas, woran du glaubst?*

RAY: *Die Menschen verstehen alles Mögliche darunter.*

MOLLY 2004: *Und glaubst du an diese Dinge?*

RAY: *All diese Dinge kann man unmöglich glauben: Gott ist eine allmächtige, denkende Person, die über uns wacht, Verträge mit uns schließt und ab und zu wütend wird. Oder er – beziehungsweise es – ist eine allgegenwärtige Lebenskraft, die Schönheit und Kreativität in die Welt bringt. Oder Gott hat alles erschaffen und sieht von weiteren Eingriffen ab...*

MOLLY 2004: *Ja, klar, aber glaubst du irgendwas davon?*

RAY: *Ich glaube an die Existenz des Universums.*

MOLLY 2004: *Das ist kein Glauben, das ist eine wissenschaftliche Tatsache.*

RAY: *Die einzig sichere Tatsache für mich sind meine eigenen Gedanken.*

MOLLY 2004: *Okay, das hier ist das Philosophie-Kapitel. Aber es gibt Tausende von wissenschaftlichen Arbeiten, die zeigen, dass es Sterne und Galaxien gibt. Und die Gesamtheit dieser Galaxien – das ist das Universum.*

RAY: *Das ist mir durchaus bekannt und ich habe auch einige dieser Arbeiten gelesen. Aber ich kann nicht sicher sein, dass diese Arbeiten oder die*

Dinge, von denen sie handeln, wirklich existieren, und nicht nur in meinen Gedanken.

MOLLY 2004: *Dann erkennst du die Existenz des Universums also nicht an?*

RAY: *Doch, ich sagte ja eben, dass ich glaube, dass es existiert. Doch das ist mein persönliches Glaubensbekenntnis – sicher wissen kann ich es nicht.*

MOLLY 2004: *Na gut. Aber meine Frage war eigentlich, ob du an Gott glaubst.*

RAY: *Wie gesagt, das Wort „Gott“ hat viele verschiedene Bedeutungen. Man könnte Gott als das Universum betrachten und ich glaube, wie gesagt, an die Existenz des Universums.*

MOLLY 2004: *Gott ist nur das Universum?*

RAY: *Nur? Das Universum ist eine ziemlich große Sache. Wenn wir der Wissenschaft glauben schenken – was ich, wie gesagt, tue –, dann ist es die größte Sache, die wir uns überhaupt vorstellen können.*

MOLLY 2004: *Naja, heute halten viele Physiker unser Universum nur für eines von vielen. Aber was ich eigentlich meinte, ist, dass die meisten Leute unter „Gott“ mehr verstehen als „nur“ die materielle Welt. Für manche ist Gott etwas, dass alles umfasst, was es gibt, aber trotzdem ein Bewusstsein hat. Du glaubst also an einen unbewussten Gott?*

RAY: *Das Universum ist – noch – nicht bewusst. Genauer gesagt ist bisher nur ein sehr kleiner Teil davon bewusst. Doch das wird sich ändern. Ich gehe davon aus, dass das Universum in Epoche sechs erwachen und zu großartiger Intelligenz kommen wird. Glaubenssache ist dabei lediglich die Existenz des Universums. Wenn wir diese als gegeben hinnehmen, so ist das Erwachen des Universums weniger ein Glaube als eine logische Schlussfolgerung, die auf derselben Wissenschaft basiert, welche besagt, dass es das Universum gibt.*

MOLLY 2004: *Interessant. Das ist das genaue Gegenteil von einem denkenden Schöpfer, der zu Beginn alles erschaffen und sich dann zurückgezogen hat. Nach dem, was du sagst, tritt das bewusste Universum in Epoche sechs überhaupt erst in Erscheinung.*

RAY: *Ganz genau. Das ist es, was die Epoche sechs im Wesentlichen ausmacht.*

KAPITEL 8

Die eng verwobenen Nutzen und Gefahren von GNR

Wir schlittern, ohne Plan, unkontrolliert und ohne Bremsen in ein neues Jahrhundert. [...] Die einzige realistische Alternative, die ich sehe, ist Verzicht: die Entwicklung bestimmter Techniken zu begrenzen, die zu gefährlich sind, indem wir den Erwerb bestimmter Arten von Wissen begrenzen.

BILL JOY, „WHY THE FUTURE DOESN'T NEED US“

Umweltschützer müssen sich nun direkt mit der Idee einer Welt auseinandersetzen, in welcher Wohlstand und technisches Potenzial ausreichend sind und kein weiteres Wachstum nötig ist.

BILL MCKIBBEN, UMWELTSCHÜTZER, WIES ALS ERSTER AUF DIE ERDERWÄRMUNG HIN¹

Fortschritt mag einmal eine gute Sache gewesen sein, doch es gibt ihn schon zu lange.

OGDEN NASH (1902–1971)

In den späten 1960ern wurde ich zum radikalen Umweltaktivisten. Eine bunte Truppe von Aktivisten und ich segelten in einem undichten Heilbutt-Boot über den Nordpazifik, um den letzten Wasserstoffbomben-Test unter Präsident Nixon zu blockieren. Auf diese Weise wurde ich Mitbegründer von Greenpeace. [...] Umweltschützer hatten oft vernünftig klingende Argumente und vollbrachten gute Taten, retteten zum Beispiel Wale und machten Luft und Wasser sauberer. Doch nun hat sich das Blatt gewendet. Die Umwelt-Kampagne gegen Biotechnik im Allgemeinen und Gentechnik im Speziellen hat ihren intellektuellen und moralischen Bankrott deutlich gemacht. Indem sie eine Null-Toleranz-Haltung gegenüber einer Technik eingenommen haben, die so viele Vorteile für Menschheit und Umwelt bringen kann, [...] haben sie sich Wissenschaftlern, Intellektuellen und Internationalisten entfremdet. Es scheint nur eine Frage der Zeit zu sein, bis die Unsinnigkeit ihrer Position von den Medien und der Öffentlichkeit erkannt wird.

PATRICK MOORE

Ich glaube, dass [...] Flucht vor und Hass auf Technik Selbstzerstörung ist. Der Buddha steckt genau so in den Schaltkreisen eines digitalen Computers und den Zahnrädern eines Getriebes wie auf dem Gipfel eines Berges oder in den Blütenblättern einer Blume. Etwas anderes zu denken, bedeutet den Buddha zu erniedrigen – und das heißt, sich selbst erniedrigen.

ROBERT M. PIRSIG, *ZEN AND THE ART OF MOTORCYCLE MAINTENANCE*

Wahrscheinlich wäre uns wohler, wenn folgende Artikel nicht im Internet kursieren würden:

Lehre deine Feinde Fürchten: Wie man eine Atombombe aus frei verfügbaren Materialien baut²

Grippevirus mit Schlangengift – leicht gemacht im Uni-Labor

Zehn einfache Modifikationen des *E. coli*-Virus*

Wie man den Pockenvirus verändert, um Impfungen zu umgehen

Chemiewaffen aus frei verfügbaren Komponenten

Billiges Flugzeug plus GPS plus Laptop ergibt unbemannte, tieffliegende Maschine mit Autopilot

Oder wie wäre es hiermit:

Die Genome der zehn gefährlichsten Krankheitserreger

Grundrisse berühmter Wolkenkratzer

Baupläne von Atomreaktoren

Die hundert verwundbarsten Punkte der modernen Gesellschaft

Die zehn größten Schwachstellen des Internets

Gesundheitsdaten von einhundert Millionen Amerikanern

Kundendaten der größten Pornoseiten

Wer das erste Dokument dieser Liste online stellt, darf mit einem baldigen Besuch des FBI's rechnen – so geschah es auch Nate Ciccolo, einem fünfzehnjährigen Schüler, im März 2000. Für ein Schulprojekt baute er ein beunruhigend akkurates Pappmaschee-Modell einer Atombombe. Im Zuge des darauf folgenden Medienansturms sagte Ciccolo den ABC News: „Irgendwer meinte so, man kann sich jetzt Informationen aus dem Internet holen. Und ich war irgendwie nicht so ganz auf dem Laufenden. Hab's ausprobiert. Bin online gegangen und nach ein paar Klicks war ich da.“³

Ciccolo fehlte natürlich die wichtigste Zutat: Plutonium. Auch hatte er keinerlei Intentionen, sich welches zu beschaffen, doch der Vorfall verursachte Wellen der Bestürzung in den Medien, ganz zu Schweigen von den Behörden, die sich mit der Verbreitung von Atomwaffen befassen. Ciccolo gab an, 563 Webseiten über den Aufbau von Atomwaffen gefunden zu haben, und infolge des Medienrummels war man bemüht, diese Seiten rasch zu entfernen. Informationen aus dem Internet zu entfernen ist leider nicht viel leichter als das Wasser des Ozeans mit einem Besen

zurückzutreiben. Viele dieser Seiten sind nach wie vor leicht zugänglich – ich werde in diesem Buch keine URLs angeben, doch sie sind nicht schwer zu finden.

Zwar sind die obenstehenden Artikelüberschriften alle erfunden, doch im Internet finden sich massenhaft Informationen zu all diesen Themen.⁴ Das Netz ist ein grandioses Suchwerkzeug. Nach meiner Erfahrung können Recherchen, die früher einen halben Tag in der Bibliothek in Anspruch nahmen, heute innerhalb weniger Minuten erledigt werden. Dies birgt offensichtliche Vorteile für die Entwicklung nützlicher Technik, allerdings profitieren hiervon auch Menschen, die der Gesellschaft feindlich gesinnt sind. Sind wir also in Gefahr? Die Antwort ist ein klares Ja. In diesem Kapitel geht es darum, wie groß diese Gefahr ist und was wir tun können.

Entsprechende Gedanken mache ich mir schon seit Jahrzehnten. Als ich Mitte der 1980er *The Age of Intelligent Machines* schrieb, war ich zutiefst besorgt, dass es die damals aufkommende Gentechnik Leuten mit entsprechender Ausbildung und Zugang zum nötigen Equipment ermöglichen würde, Bakterien und Viren zu modifizieren, um neue Krankheiten zu erschaffen. In böswilligen oder auch lediglich unvorsichtigen Händen könnte Gentechnik genutzt werden um extrem ansteckende, schwer nachweisbare und tödliche Krankheitserreger zu züchten.⁵

In den 1980ern war dies kein einfaches, aber ein mögliches Unterfangen. Wir wissen heute, dass in Biowaffenprogrammen der Sowjetunion und anderer Länder genau das getan wurde.⁶ Damals entschied ich mich bewusst, dieses Thema in meinem Buch auszulassen, um nicht den falschen Leuten destruktive Ideen zu liefern. Ich wollte nicht eines Tages das Radio einschalten und hören, dass die Verursacher einer Katastrophe von Ray Kurzweil inspiriert wurden.

Infolge dieser Entscheidung stand mein Buch in der gerechtfertigten Kritik, die Vorteile zukünftiger Technik zu betonen und dabei die Gefahren zu ignorieren. Als ich 1997–1998 *The Age of Spiritual Machines* schrieb, versuchte ich daher, sowohl den Vorteilen als auch den Gefahren gerecht zu werden.⁷ Zu diesem Zeitpunkt hatte die Problematik bereits genug öffentliche Aufmerksamkeit erlangt (beispielsweise durch den Film *Outbreak* von 1995, welcher Schrecken und Panik durch Freisetzung eines neuen Virus porträtiert), sodass ich keine Bedenken mehr hatte, öffentlich darüber zu sprechen.

Im September 1998, ich hatte soeben mein Manuskript vollendet, traf ich in einer Bar in Lake Tahoe auf Bill Joy, einen geschätzten und langjährigen Kollegen in Sachen Hochtechnologie. Obwohl ich Joy, den Entwickler der führenden Programmiersprache für interaktive Webanwendungen (Java) und Mitbegründer von Sun Microsystems, stets sehr bewundert habe, galt meine Aufmerksamkeit bei

dieser kurzen Zusammenkunft nicht ihm, sondern der dritten Person an unserem Tisch: dem bedeutenden Philosophen John Searle (University of California in Berkeley). Searle machte sich einen Namen, indem er die tiefsten Geheimnisse des menschlichen Bewusstseins gegen Scheinattacken durch Materialisten wie Ray Kurzweil verteidigte (eine Bezeichnung, gegen die ich mich im nächsten Kapitel wehren werde).

Searle und ich hatten gerade in der Abschlusssitzung von George Gilders Telecosm-Konferenz darüber diskutiert, ob Maschinen bewusst sein können. Die Veranstaltung trug den Titel „Spiritual Machines“ und diente der Diskussion der philosophischen Implikationen meines bald erscheinenden Buches. Ich hatte Joy eine Vorabversion zukommen lassen und versuchte, ihm die Bewusstseinsdebatte zwischen Searle und mir zu skizzieren.

Wie sich herausstellte, hatte ein ganz anderes Thema Joys Interesse geweckt, und zwar die drohenden Gefahren der drei aufstrebenden Technikfelder, die ich in dem Buch vorstellte: Genetik, Nanotechnik und Robotik (die auch hier beschriebene GNR-Revolution). Meine Besprechung der Schattenseiten zukünftiger Technik hatte Joys Besorgnis erregt, wie er später in seiner berühmten Titelstory „Why the Future Doesn't Need Us“ für *Wired* berichtete.⁸ In besagtem Artikel beschrieb Joy, wie er seine Freunde in der Welt der Wissenschaft und Technik befragte, ob meine Voraussagen glaubhaft wären, und wie er mit Bestürzung erfuhr, wie wenig nur fehlte, damit sie wahr würden.

Joys Artikel behandelte ausschließlich negative Szenarien und löste einen Aufruhr aus. Einer der bedeutendsten Akteure der modernen Technik warnte hier vor schrecklichen Gefahren derselben. Die Sache erinnerte ein wenig an damals, als George Soros, ein erzkapitalistischer Währungsspekulant, vorsichtige Kritik an den Ausartungen des unregulierten Kapitalismus äußerte. Joy löste jedoch eine noch viel heftigere Debatte aus. Der *New York Times* zufolge wurden Joys Äußerungen in über zehntausend Artikeln aufgegriffen und diskutiert – mehr als jeder andere technologische Kommentar in der Geschichte. Mein Versuch, mich in der Lake Tahoe Lounge zu entspannen, endete in der Entfachung von zwei Debatten, die noch lange Zeit andauern sollten – mein Dialog mit John Searle dauert bis zum heutigen Tag an.

Obwohl ich der Urheber von Joys Beunruhigung war, behielt ich meinen Ruf als „technologischer Optimist“ und wurde in eine Vielzahl von Foren eingeladen, um über den Nutzen und die Gefahren zukünftiger Technik zu debattieren. Zwar wird meist von mir erwartet, den „Nutzen“ zu vertreten, doch ich verbringe nicht selten die meiste Zeit damit, aufzuzeigen, wie realistisch die Gefahren sind.

Viele Leute interpretierten Joys Artikel als Aufruf, technische Entwicklungen zu drosseln – nicht alle, aber die „gefährlichen“, wie die Nanotechnik. Joy arbeitet heute mit dem legendären Unternehmen Kleiner, Perkins, Caufield & Byers in Silicon Valley zusammen und investiert unter anderem in Nanotechnik für erneuerbare Energien und andere natürliche Ressourcen. Er stellt klar, dass ein Verzicht auf technische Entwicklung nie in seinem Sinne war. Seine Betonung liegt, so schrieb er kürzlich in einer privaten E-Mail, auf seinem Aufruf, „die Entwicklung bestimmter Techniken zu begrenzen, die zu gefährlich sind“ (siehe Zitat zu Beginn des Kapitels), nicht gemeint sei damit eine komplette Prohibition. Er schlägt beispielsweise eine Restriktion selbstreplizierender Nanotechnik vor, welche auch das (von Eric Drexler und Christine Peterson gegründete) Foresight Institute empfiehlt. Dies ist an sich eine vernünftige Richtlinie, wobei ich denke, dass es zwei Ausnahmen geben muss (siehe unten, [Seite 424f.](#)).

Des Weiteren spricht sich Joy – mit meiner Zustimmung – gegen die Veröffentlichung von Gensequenzen von Krankheitserregern im Internet aus. Er würde sich wünschen, dass sich Wissenschaftler weltweit freiwilligen Regulationen unterwerfen, denn „wenn wir erst eine Katastrophe abwarten, gibt es nachher viel schärfere, schädlichere Restriktionen“. Joy hofft, dass wir „lockere Regulationen schaffen, sodass wir in Genuss der meisten Vorteile kommen“.

Andere dagegen, wie der Umweltschützer Bill McKibben, der als einer der Ersten vor dem Klimawandel warnte, befürwortet die Einstellung ganzer Forschungsfelder wie Biotechnik, Nanotechnik oder gar der Technik allgemein. Wie ich weiter unten (siehe [Seite 423](#)) näher erläutern werde, ist der Verzicht auf eine größere Techniksparte unmöglich, ohne die technische Entwicklung insgesamt zu beenden. Das wiederum würde eine totalitäre Regierung im Stile von *Brave New World* erfordern, die jegliche technische Entwicklung verbietet. Nicht nur wäre eine solche Lösung unvereinbar mit unseren demokratischen Werten, die technische Entwicklung würde sich dadurch außerdem zum Vorteil verantwortungsloser Akteure (beispielsweise Schurkenstaaten) in den Untergrund verlagern.

Der Nutzen ist eng verknüpft...

Es war die beste Zeit und die schlimmste Zeit, es war das Zeitalter der Weisheit und der Torheit, die Epoche des Glaubens und des Unglaubens, eine Saison des Lichts und der Dunkelheit, es war der Frühling der Hoffnung, es war der Winter der Verzweiflung, alles und nichts lag vor uns, wir alle befanden uns auf direktem Weg in den Himmel und wir alle bewegten uns direkt in die Gegenrichtung.

CHARLES DICKENS, *A TALE OF TWO CITIES*

Es ist, als würde man für den Pflug argumentieren. Man weiß, dass einige Leute dagegen sein werden, aber man weiß ebenso gut, dass es ihn geben wird.

JAMES HUGHES, GESCHÄFTSFÜHRER DER TRANSHUMANIST ASSOCIATION UND SOZIOLOGE AM TRINITY COLLEGE, IN DER DEBATTE „SOLLTEN MENSCHEN DIE POSTHUMANITÄT BEGRÜSSEN ODER SICH IHR WIDERSETZEN?“

Technik war immer schon ein zweischneidiges Schwert. Einerseits brachte sie uns große Vorteile, erhöhte unsere Lebenserwartung, befreite uns von körperlich und psychisch belastenden Arbeiten und eröffnete uns viele neue Möglichkeiten – andererseits schuf sie immer wieder neue Gefahren. Technik unterstützt sowohl unsere kreative als auch unsere destruktive Natur.

Für einen bedeutenden Teil unserer Spezies konnten Armut, Krankheit, schwere Arbeit und Elend, welche die Geschichte der Menschheit geprägt haben, bereits gelindert werden. Viele arbeiten heute nicht mehr fürs nackte Überleben, sondern um sich selbst zu verwirklichen. Wir haben immer bessere Mittel um uns auszudrücken. Indem das Internet nun auch weniger entwickelte Weltregionen erreicht, werden wir große Fortschritte machen, was die Verfügbarkeit von hochwertiger Bildung und medizinischen Informationen betrifft. Immer mehr Menschen haben Zugang zu Kultur, Kunst und dem exponentiell wachsenden Wissensschatz der Menschheit. Im nächsten Kapitel werde ich noch näher auf den in **Kapitel 2** angesprochenen Bericht der Weltbank über den weltweiten Rückgang der Armut eingehen.

Die Anzahl der Demokratien ist durch den Einfluss dezentralisierter elektronischer Kommunikation seit der Nachkriegszeit von etwa zwanzig auf über hundert gestiegen. Die größte Demokratisierungswelle erfolgte in den 1990ern mit dem Fall des Eisernen Vorhangs – begleitet vom Wachstum des Internets und verwandten Techniken. Natürlich gibt es auf diesem Gebiet noch viel zu tun.

Die Biotechnik steht kurz vor ersten großen Durchbrüchen bei der Bekämpfung von Krankheit und Alter. In zwanzig bis dreißig Jahren werden N und R hinzukommen und diese Entwicklung exponentiell weitertragen. Wie ich in den vorigen Kapiteln geschildert habe, werden diese Techniken großen Wohlstand schaffen, somit die Armut überwinden, und uns ermöglichen, all unsere materiellen Bedürfnisse durch die Umwandlung von günstigen Rohstoffen und Informationen in beliebige Produkte zu decken.

Wir werden uns zunehmend in virtuellen Umgebungen aufhalten, wo wir jegliche Art von Erfahrung mit beliebigen (realen oder simulierten) anderen erleben können. In ähnlicher Weise werden wir durch Nanotechnik die physische Welt nach unseren Wünschen und Bedürfnissen formen können. Die Probleme des sich dem

Ende zuneigenden Industriezeitalters werden gelöst, verbleibende Umweltbelastungen bereinigt. Nanogefertigte Brennstoff- und Solarzellen werden uns mit sauberer Energie versorgen. Nanobots werden in unseren physischen Körpern Krankheitserreger zerstören, Ablagerungen aus fehlgebildeten Proteinen oder Protofibrillen beseitigen, DNS reparieren und die Alterung umkehren. Wir werden sämtliche Systeme unserer Körper und Gehirne überarbeiten und in eine deutlich leistungsfähigere und beständigere Form bringen können.

Am bedeutendsten wird die Verschmelzung biologischer und nichtbiologischer Intelligenz sein, wobei nichtbiologische Intelligenz bald überwiegen wird. Der Menschheitsbegriff wird sich drastisch erweitern. Wir werden unsere Fähigkeiten, Wissen aller Art, von Wissenschaft bis Kunst, zu erschaffen und zu verstehen, massiv steigern und dabei neue Möglichkeiten der Interaktion mit unserer Umgebung und mit anderen Menschen erlangen.

Doch der Nutzen ist eng verknüpft...

...mit den Gefahren

„Pflanzen“, deren „Blätter“ gerade einmal so effizient sind wie heutige Solarzellen, könnten alle realen Pflanzen verdrängen und die Biosphäre mit ungenießbarem Blattwerk überziehen. Zähe, allesfressende Bakterien könnten reale Bakterien verdrängen: Sie könnten sich wie durch Pollenflug ausbreiten, sich schnell replizieren und die Biosphäre innerhalb von Tagen zu Staub reduzieren. Leicht könnten gefährliche, zähe, kleine und sich schnell verbreitende Replikatoren entstehen, die nicht mehr aufzuhalten sind – zumindest wenn wir keine Vorkehrungen treffen. Es fällt uns schon schwer genug, Viren und Fruchtfiegen unter Kontrolle zu bekommen.

ERIC DREXLER

Neben vielen bemerkenswerten Errungenschaften wurde Technik im zwanzigsten Jahrhundert auch häufig in den Dienst unserer destruktiven Natur gestellt – von Stalins Panzern bis zu Hitlers Deportationszügen. Die tragischen Ereignisse vom 11. September 2001 sind ein weiteres Beispiel, was Technik (in diesem Fall Gebäude und Flugzeuge) in der Hand von Menschen mit zerstörerischen Absichten bewirken kann. Wir leben mit einem Arsenal an Nuklearwaffen (die nicht alle ausgewiesen sind) um das Leben aller Säugetiere unseres Planeten zu beenden.

Seit den 1980ern verfügt man in biotechnischen Hochschullaboren über Wissen und Ausrüstung, um Krankheitserreger zu erzeugen, die potenziell gefährlicher sind als Atomwaffen.⁹ Eine an der Johns Hopkins University unter dem Namen „Dark Winter“ durchgeführte Kriegssimulation ergab, dass die Aussetzung von gewöhnlichen Pockenviren in drei US-amerikanischen Städten geschätzt eine

Million Opfer fordern würde. Noch viel verheerender wären die Auswirkungen eines biotechnischen Pockenerregers, gegen den bestehende Impfungen wirkungslos sind.¹⁰ Wie real diese Gefahr ist, zeigte ein 2001 in Australien durchgeführtes Experiment, bei dem der Mäusepocken-Virus genetisch verändert wurde – mit Auswirkungen auf die Immunantwort: Der Mäusepocken-Impfstoff konnte dem Virus nichts mehr anhaben.¹¹ Diese Gefahren hallen nach in unserem historischen Gedächtnis: Die Beulenpest raffte ein Drittel der europäischen Bevölkerung dahin; 1918 kostete die Spanische Grippe zwanzig Millionen Menschen das Leben.¹²

Werden diese Gefahren die Beschleunigung von Leistung, Effizienz und Intelligenz komplexer Systeme (wie die Menschen und seine Technik) aufhalten? Bislang hat sich die Komplexitätszunahme auf unserem Planeten gleichmäßig beschleunigt, trotz zahlreicher Katastrophen sowohl internen wie externen Ursprungs. Dies gilt sowohl für die biologische Evolution (die unter anderem größere Asteroiden- und Meteoriteneinschläge zu verkraften hatte) als auch für die Geschichte der Menschheit (die von einer nicht enden wollenden Reihe größerer Kriege erschüttert wurde).

Die effektive Reaktion der Weltgemeinschaft auf den SARS-Virus (Schweres Akutes Respiratorisches Syndrom) sollte uns jedoch Hoffnung geben. Zwar ist zum Zeitpunkt der Entstehung dieses Buches eine weitere, noch ansteckendere SARS-Epidemie nicht auszuschließen, doch die Eindämmungsmaßnahmen waren relativ erfolgreich und konnten verhindern, dass ein tragischer Ausbruch zu einer Katastrophe wurde.

Ein Teil dieser Maßnahmen bestand in altbewährten Mitteln wie Quarantänen und Atemmasken. Doch die Bekämpfung der Krankheit wäre in dieser Form ohne moderne Technik nicht möglich gewesen. Die DNS des SARS-Virus konnte innerhalb von nur einunddreißig Tagen nach den ersten Infektionen sequenziert werden – derselbe Prozess dauerte bei HIV noch fünfzehn Jahre. So konnten schnell effiziente Tests entwickelt werden, um Infektionen festzustellen. Globale Kommunikation ermöglichte zudem ein weltweit koordiniertes Vorgehen – bei den Epidemien in früheren Zeiten war das noch nicht möglich.

Indem sich die technische Entwicklung auf eine volle Entfaltung von GNR zubewegt, wird sie noch mehr dieser gegensätzlichen Potenziale hervorbringen: ein Feuerwerk der Kreativität durch die Vervielfachung der menschlichen Intelligenz in Kombination mit großen neuartigen Bedrohungen. Das Paradebeispiel für die Risiken ist ungezügelter Replikation von Nanobots. Damit Nanobots etwas Sinnvolles bewirken können, müssen Billionen davon produziert werden. Solche

Mengen werden sich nur durch Selbstreplikation erzeugen lassen – also nach demselben Prinzip, durch welches aus einer befruchteten Eizelle die Billionen von Zellen eines ausgewachsenen Menschen entstehen. Und so wie biologische Selbstreplikation auf Abwege geraten und den Organismus zerstören kann (die Rede ist von Krebs), könnte ein Defekt des Mechanismus, welcher die Nanobot-Selbstreplikation drosseln soll, die gesamte physikalische Welt – biologisch oder nicht – gefährden (das sogenannte „Graue-Schmiere-Szenario“).

Lebewesen, Menschen eingeschlossen, wären die ersten Opfer einer sich exponentiell ausbreitenden Nanobot-Plage. Der Grundbaustein für Nanobots ist Kohlenstoff. Kohlenstoff kann bis zu vier Atombindungen bilden und ist daher das ideale Bauelement für molekulare Fertigung. Kohlenstoffmoleküle können gerade Ketten, Zickzacks, Ringe, Nanoröhren (zu Röhren gestapelte Sechsecke), Flächen, Fußbälle (Kugeln aus Fünf- und Sechsecken) und viele andere Formen bilden. Da biologisches Leben ebenfalls auf Kohlenstoff beruht, wäre Biomasse eine erstklassige Rohstoffquelle für außer Kontrolle geratene Nanobots. Biologische Organismen enthalten zudem einen Energievorrat in Form von Glukose und ATP.¹³

Auch nützliche Spurenelemente wie Sauerstoff, Schwefel, Eisen und Kalzium finden sich in der Biomasse.

Wie lang würden unkontrolliert replizierende Nanobots brauchen, um die Biomasse der Erde zu vernichten? Die Biomasse umfasst eine Anzahl von Kohlenstoffatomen in der Größenordnung von 10^{45} .¹⁴ Ein einzelner replikationsfähiger Nanobot umfasst geschätzt 10^6 Kohlenstoffatome. (Es soll hier nicht um genaue Zahlen gehen, sondern lediglich um eine Abschätzung von Größenordnungen). Dieser niederträchtige Nanobot müsste also etwa 10^{39} Kopien von sich selbst anfertigen, um die Biomasse zu ersetzen, wofür 130 Replikationsschritte nötig wären (mit jedem Schritt würde sich die umgewandelte Masse verdoppeln). Rob Freitas schätzte die Replikationszeit auf mindestens hundert Sekunden, 130 Replikationszyklen dauerten demnach dreieinhalb Stunden.¹⁵ Die tatsächliche Zerstörungsgeschwindigkeit wäre allerdings geringer, da die Biomasse nicht „effizient“ angeordnet ist. Der limitierende Faktor wäre letztlich das Vorwärtstommen der alles vernichtenden Front. Aufgrund ihrer geringen Größe können sich Nanobots nicht sehr schnell fortbewegen – es würde wahrscheinlich Wochen dauern, bis sie den ganzen Planeten überzogen hätten.

Vor diesem Hintergrund lässt sich ein noch tückischeres Szenario konstruieren. In einem Zwei-Phasen-Angriff könnten sich die Nanobots zunächst über Wochen hinweg in der gesamte Biomasse verteilen, sie jedoch zunächst nur zu einem sehr geringen Teil – sagen wir ein tausendstel Billionstel (10^{-15}) – konsumieren. Bei

Erreichen einer „optimalen“ Verteilung könnte dann die zweite Phase beginnen: die einzelnen „Nanobot-Keime“ würden sich nun rasch vermehren um mit einem Schlag die Biomasse zu zerstören. Jeder dieser Nanobots bräuchte fünfzig Verdopplungen – etwa neunzig Minuten – um sich eintausend Billionen Mal zu vervielfachen. Die Zerstörung der Biomasse würde nun nicht mehr durch die langsame Fortbewegung der Nanobotwelle gehemmt, da die Nanobots bereits über den ganzen Planeten verteilt wären.

Der Punkt ist, dass die komplette Biomasse innerhalb kürzester Zeit zerstört werden kann, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Wie ich später darlege (siehe [Seite 431](#)), werden wir definitiv ein Nanotechnik-Immunsystem einrichten, bevor solche Szenarien möglich werden. Dieses Immunsystem muss nicht nur offensichtliche zerstörerische Aktivitäten unterbinden, sondern auch potenziell gefährliche (heimliche) Replikation in sehr kleiner Konzentration verhindern.

Mike Treder und Chris Phoenix – Geschäftsführer beziehungsweise wissenschaftlicher Leiter des Center for Responsible Nanotechnology –, Eric Drexler, Rober Freitas, Ralph Merkle und andere haben Schutzvorrichtungen für zukünftige molekulare Nanoassembler beschrieben, welche die Erzeugung selbstreplizierender Nanotechnik verhindern.¹⁶ Weiter unten beschreibe ich einige dieser Strategien. Völlig ausschließen lässt sich das Graue-Schmiere-Szenario dadurch allerdings nicht. Es wird noch weitere Gründe (abgesehen von Massenproduktion) geben, selbstreplizierende Nanobots zu erzeugen. Das oben beschriebene Nanotechnik-Immunsystem wird auf Selbstreplikation angewiesen sein, da es uns andernfalls nicht verteidigen kann. Auch für die (in [Kapitel 6](#) besprochene) schnelle Ausbreitung unserer Intelligenz über die Erde hinaus wird Selbstreplikation nötig sein. Selbstreplikation wird zudem wahrscheinlich von militärischer Bedeutung sein. Davon abgesehen können auch Schutzvorrichtungen (beispielsweise die auf [Seite 425](#) beschriebene „Broadcast-Architektur“) durch entschlossenes Handeln von Feinden und Terroristen außer Kraft gesetzt werden.

Freitas hat eine Reihe weiterer desaströser Szenarios der Nanobot-Technik beschrieben.¹⁷ Im sogenannten „Grauer-Plankton-Szenario“ vergreifen sich bösartige Nanobots an den Methanvorräten (CH₄) im Meeresboden sowie am im Wasser gelösten Kohlenstoffdioxid (CO₂). Im „Grauer-Staub-Szenario“ replizieren sich die Nanobots mithilfe von Grundelementen im Luftstaub und von Solarenergie. Im „Graue-Flechten-Szenario“ extrahieren sie Kohlenstoff und andere Elemente aus Felsen.

Eine Palette von Existenzbedrohungen

Wenn ein bisschen Wissen gefährlich ist, wo ist dann eine Person, die so viel davon hat, dass sie außer Gefahr ist?

THOMAS HENRY

Weiter unten (siehe den Abschnitt „Ein GNR-Schutzprogramm“ auf [Seite 436](#)) beschreibe ich Schritte, die wir unternehmen können, um diesen Gefahren zu begegnen; doch keine der Strategien, die wir heute entwickeln können, kann absolute Sicherheit garantieren. Nick Bostrom beschreibt diese Gefahren als „Existenzbedrohungen“* und definiert sie anhand folgender Tabelle:¹⁸

Bostroms Bedrohungskategorien

<i>Rahmen</i>	<i>Art des Risikos</i>		
		moderat	schwer
	global	Ozonloch	<i>Existenzbedrohungen</i>
	lokal	Rezession	Völkermord
	persönlich	Autodiebstahl	Tod
		erträglich	tödlich

Die erste menschengemachte Existenzbedrohung für das Leben auf der Erde ergab sich mit der Erfindung der Wasserstoffbombe und dem darauffolgenden Wettrüsten der Atommächte im Kalten Krieg. Berichten zufolge schätzte Präsident Kennedy die Wahrscheinlichkeit eines alles vernichtenden Atomkriegs während der Kubakrise auf 33 bis 50 Prozent.¹⁹ Der legendäre Informationstheoretiker (und spätere Vorsitzende des Air Force Strategic Missiles Evaluation Committee) John von Neumann schätzte die Wahrscheinlichkeit eines nuklearen Armageddons auf knapp 100 Prozent.²⁰ Welcher informierte Beobachter hätte wohl damals in den 1960ern damit gerechnet, dass die Welt die folgenden vierzig Jahre ohne eine einzige nukleare Detonation (außer zu Testzwecken) überstehen würde?

Trotz des Chaos in der internationalen Politik müssen wir dankbar sein, dass bisher der Kriegseinsatz von Atomwaffen vermieden werden konnte. Aufatmen können wir natürlich noch nicht, da immer noch genügend Wasserstoffbomben existieren, um alles menschliche Leben vielfach auszulöschen.²¹ Was heute kaum noch öffentlich diskutiert wird: Obwohl sich die Beziehung zwischen den USA und Russland scheinbar entspannt hat, haben die beiden Staaten weiterhin massive, abschlussbereite ICBM-Arsenale aufeinander gerichtet.

Die Verbreitung von Atomtechnik und die breite Verfügbarkeit von nuklearem Brennstoff und Fachwissen sind ein weiterer Grund zur Beunruhigung, wenn auch keine Existenzbedrohung für unsere Zivilisation. (Das heißt, nur ein großer Atomkrieg mit Langstreckenraketen könnte die komplette Menschheit auslöschen). Atomwaffenverbreitung und Atomterrorismus gehören in die Kategorie „schwere lokale Bedrohungen“, zusammen mit Völkermord. Die Bedrohung ist jedoch äußerst ernst zu nehmen, da die Abschreckungslogik der garantierten gegenseitigen Auslöschung im Fall von Selbstmordattentaten nicht greift.

Möglicherweise haben wir eine weitere Existenzbedrohung geschaffen: künstliche Viren, die sich schnell verbreiten, jedoch eine lange Inkubationszeit haben – und absolut tödlich wirken. Manche Viren – zum Beispiel Grippe und Erkältung – sind hochansteckend. Andere sind tödlich, so wie HIV. Nur selten kommen diese beiden Eigenschaften zusammen. Heutige Menschen sind aufgrund unserer Entwicklungsgeschichte gegen die meisten sich leicht verbreitenden Viren immun. Sexuelle Reproduktion sorgte für eine starke genetische Durchmischung der Population und somit für ein vielseitiges Immunsystem, mit welchem unsere Spezies Virusepidemien überstehen kann. An der Beulenpest in Europa starben zwar viele, aber nicht alle Menschen. Für andere Viren mit beiden negativen Eigenschaften – ansteckend und tödlich –, wie beispielsweise Pocken, konnten wir im Laufe der Zeit technische Schutzmaßnahmen in Form von Impfungen entwickeln. Gentechnik könnte jedoch plötzlich neue Erreger hervorbringen, gegen die unsere evolutionär gewachsenen Abwehrmaßnahmen – biologische wie technische – völlig machtlos sind.

Stark ansteckende aber harmlose Erreger (zum Beispiel Grippe- oder Erkältungsviren) könnten mit Genen versehen werden, die tödliches Gift produzieren. Dieses Szenario stellt eine weitere Existenzbedrohung dar und gab Anlass zur Asilomar-Konferenz, die sich mit dieser Thematik befasste und entsprechende Sicherheits- und Ethikrichtlinien formulierte. Soweit haben diese Richtlinien ihren Zweck erfüllt – doch die Techniken für Genmanipulation entwickeln sich rasant.

Im Jahr 2003 kämpfte die Welt – erfolgreich – gegen den SARS-Virus. Der Ausbruch von SARS ist das Ergebnis einer Kombination von ursprünglichem und modernem Leben: Der Virus wurde vermutlich von exotischen Tieren, möglicherweise Ziveterkatzen, durch nahen Kontakt auf Menschen übertragen und verbreitete sich dann über Flugzeugpassagiere in der Welt. SARS bot uns eine Trockenübung mit einem unbekannten Virus, der leicht übertragbar ist, lange

außerhalb des menschlichen Körpers überlebt und mit geschätzt 14 bis 20 Prozent eine hohe Sterberate aufweist.

Die Erfahrung mit SARS zeigt, dass die meisten Viren, selbst wenn sie leicht übertragbar und relativ tödlich sind, eine ernst zu nehmende Gefahr, aber nicht unbedingt eine Existenzbedrohung darstellen. SARS, das übrigens natürlichen Ursprungs zu sein scheint, verbreitet sich zwar schnell durch Tröpfcheninfektion, aber nicht direkt über die Luft. Die Inkubationszeit liegt schätzungsweise zwischen einem Tag und zwei Wochen – eine längere Inkubationsdauer würde dem Virus mehr Zeit geben, sich exponentiell zu vermehren, bevor er bemerkt würde.²²

SARS ist tödlich, wobei die Mehrheit der Erkrankten überlebt. Allerdings besteht weiterhin die Gefahr eines künstlich geschaffenen Virus, der sich noch schneller verbreitet als SARS, eine längere Inkubationszeit hat und praktisch immer tödlich ist. Der Pocken-Virus kommt dem relativ nahe. Zwar gibt es eine (recht krude) Impfung gegen Pocken, doch diese könnte sich gegen eine genmanipulierte Version als nutzlos erweisen.

Wie zuvor beschrieben wird die (Existenz-)Bedrohung durch biotechnisch konstruierte Viren in den 2020ern ihren Schrecken verlieren, wenn effektive Antivirustechnik mittels Nanobots verfügbar wird.²³ Die Nanotechnik – welche tausendfach stärker, schneller und intelligenter ist als biologische Systeme – wird jedoch eine neue Existenzbedrohung durch selbstreplizierende Nanobots mit sich bringen. Diese Bedrohung wird wiederum durch starke künstliche Intelligenz aufgehoben werden, welche ihrerseits neue Bedrohungen durch „böartige“ KI schaffen wird (siehe [Seite 433](#)).

Das Vorsorgeprinzip. Bostrom, Freitas und nicht zuletzt ich selbst haben darauf hingewiesen, dass wir keine Experimente machen dürfen, wenn es um Existenzbedrohungen geht. Es gibt unterschiedliche Auslegungen des sogenannten „Vorsorgeprinzips“. (Wenn die Konsequenzen einer Handlung unbekannt sind, jedoch von manchen Wissenschaftlern als auch nur geringfügig riskant eingestuft werden, so ist es besser, diese Handlung nicht auszuführen, als negative Konsequenzen zu riskieren). Doch es ist klar, dass wir Strategien finden müssen, um diese Risiken zu minimieren. Darum vernehmen wir auch immer lauter Rufe nach einem Stopp der technischen Entwicklung, um Existenzbedrohungen rechtzeitig zu verhindern. Verzicht ist jedoch nicht die richtige Antwort und würde uns nur um die Vorteile der zukünftigen Technik bringen, während ein Desaster dabei nur wahrscheinlicher werden würde. Max More beschreibt die Grenzen des Vorsorgeprinzips und empfiehlt, es durch sein sogenanntes „proaktionäres Prinzip“

zu ersetzen, welches die Gefahren von Tätigkeit und Untätigkeit gegeneinander aufwiegt.²⁴

Bevor ich darauf eingehe, wie wir den neuen Existenzbedrohungen begegnen können, möchte ich einige weitere Risiken vorstellen, die Bostrom und andere postuliert haben.

Je niedriger die Interaktionsebene, desto größer das explosive Potenzial. Vor Kurzem wurde diskutiert, ob künftige hochenergetische Teilchenbeschleuniger eine Kettenreaktion von Energiezustandsänderungen auf subatomarer Ebene auslösen könnten, die zu einem exponentiell wachsenden Feld der Zerstörung führen, in dem alle Atome in unserer galaktischen Umgebung auseinandergebrochen würden. Es gibt eine Reihe solcher Szenarien, eines davon ist die Entstehung eines Schwarzen Lochs, das unser Sonnensystem verschlingt.

Analysen zeigen, dass diese Szenarien äußerst unwahrscheinlich sind, doch nicht alle Physiker sind so optimistisch.²⁵ Zwar sind die Analysen mathematisch korrekt, doch es gibt nach wie vor keine einheitlichen Formeln zur ganzheitlichen Beschreibung der physikalischen Welt. Diese Schreckensbilder mögen weit hergeholt erscheinen, doch je niedriger die physikalische Ebene, auf der explosive Reaktionen ablaufen, desto heftiger scheinen diese Reaktionen auszufallen.

Alfred Nobel entdeckte das Dynamit, als er chemische Interaktionen zwischen Molekülen untersuchte. Die Atombombe, Zehntausende Male explosiver als Dynamit, basiert auf nuklearen Interaktionen großer Atome – eine weitaus niedrigere Ebene als die der molekularen Dynamitreaktion. Die Wasserstoffbombe, wiederum Tausende Male stärker als die Atombombe, beruht auf Interaktionen der noch niedrigeren Ebene kleiner Atome. Dies heißt natürlich nicht unbedingt, dass es noch heftigere destruktive Kettenreaktionen auf subatomarer Ebene geben muss – die Vermutung liegt jedoch nahe.

Nach meiner eigenen Einschätzung ist es unwahrscheinlich, dass wir eine solche Reaktion auslösen – ebenso unwahrscheinlich, wie die versehentliche Konstruktion einer Atombombe. Derartige Mechanismen erfordern genauestens abgestimmte Materialien und Prozesse. Die erste Atombombe war das Ergebnis eines aufwendigen und komplizierten Forschungsprojekts. Noch unwahrscheinlicher ist es, zufällig eine Wasserstoffbombe zu bauen, denn diese besteht in einer Atombombe in Kombination mit einem Wasserstoffkern und weiteren Elementen. Wiederum noch unwahrscheinlich erscheint es, dass versehentlich die exakten Umstände geschaffen werden, die zu einer katastrophalen Kettenreaktion auf subatomarer Ebene führen. Die hypothetischen Konsequenzen wären jedoch so verheerend, dass wir sie im Sinne des Vorsorgeprinzips nicht auf die leichte

Schulter nehmen sollten. Wir sollten uns genau mit den Risiken auseinandersetzen, bevor wir eine neue Generation von Teilchenbeschleunigern in Betrieb nehmen.

Abschaltung der Simulation. Eine weitere von Bostrom und anderen beschriebene Existenzbedrohung ist die Möglichkeit, dass wir in einer Simulation leben und diese Simulation abgeschaltet wird. Man könnte meinen, dass sich dagegen wenig tun lässt. Da wir jedoch Gegenstand dieser Simulation sind, können wir ihren Verlauf beeinflussen – und die beste Möglichkeit, eine Abschaltung zu verhindern, dürfte darin bestehen, das Interesse der Beobachter der Simulation zu wecken. Unter der Annahme, dass überhaupt jemand zusieht, dürfte eine Abschaltung unwahrscheinlicher sein, wenn die Simulation ein faszinierendes Spektakel ist.

Nun können wir uns lange den Kopf zerbrechen, was eine Simulation interessant macht – auf alle Fälle eine Rolle spielen dürfte allerdings die Schaffung neuen Wissens. Ohne die Vorlieben unseres hypothetischen Beobachters zu kennen, dürfen wir wohl annehmen, dass die Singularität mindestens so spannend anzusehen ist wie jede andere vorstellbare Entwicklung, und auf alle Fälle entstehen dabei Unmengen an neuem Wissen. Es könnte gut sein, dass die Wissensexplosion der Singularität der eigentliche Zweck der Simulation ist. Der beste Weg, ihre Abschaltung zu verhindern, ist daher möglicherweise eine „konstruktive“ Singularität (bei welcher eine Existenzvernichtung durch Graue Schmiere oder eine Dominanz bössartiger KI vermieden wird). Natürlich haben wir ohnehin allen Grund uns um eine konstruktive Singularität zu bemühen.

Wenn die Welt, in der wir leben, eine Computersimulation ist, so ist sie ziemlich überzeugend. Sie ist sogar so detailliert, dass wir sie gleichwohl als unsere Realität akzeptieren können. So oder so ist sie die einzige Realität, auf die wir Zugriff haben.

Unsere Welt scheint eine lange und bewegte Geschichte hinter sich zu haben. Das bedeutet entweder, dass sie keine Simulation ist, oder, dass die Simulation schon sehr lange läuft und mit großer Wahrscheinlichkeit nicht demnächst enden wird. Natürlich könnte es auch sein, dass in der Simulation zwar alles auf eine lange Geschichte hindeutet, ohne dass diese tatsächlich stattgefunden hat.

Wie in **Kapitel 6** besprochen gibt es die Theorie, dass fortgeschrittene Zivilisationen neue Universen erschaffen, um Berechnungen durchzuführen (oder, anders gesagt, ihre eigenen Berechnungen zu erweitern). Eine Möglichkeit wäre, dass wir in einem solchen von einer anderen Zivilisation erschaffenen Universum leben. Vielleicht benutzt diese Zivilisation unser Universum um einen evolutionären Algorithmus (in Form unserer Evolution) auszuführen, um eine

Wissensexplosion (in Form unserer technischen Singularität) zu erreichen. Sollte dies der Fall sein, so würde die beobachtende Zivilisation die Simulation vermutlich abschalten, falls etwas schief läuft und die Singularität ausbleibt.

Auch über dieses Szenario mache ich mir nicht allzu viele Gedanken, da in diesem Fall eine Abschaltung nur durch die Strategie verhindert werden kann, die wir ohnehin verfolgen müssen.

Kollision. Eine andere bekannte Bedrohung sind mögliche Kollisionen mit großen Asteroiden oder Kometen, wie sie sich in der Erdgeschichte schon mehrfach zugetragen haben – stets mit drastischen Folgen für die damaligen Lebewesen. Dies ist natürlich keine Gefahr der modernen Technik, vielmehr wird Technik uns (spätestens in einigen Jahrzehnten) davor beschützen können. Kleinere Einschläge sind keine Seltenheit – große, vernichtende Besucher aus dem All dagegen äußerst rar. Bisher ist keiner in Sicht, und es ist so gut wie sicher, dass unsere Zivilisation, sollte je eine Kollision drohen, bis dahin über Mittel verfügt, den Eindringling rechtzeitig zu zerstören.

Eine weitere Existenzbedrohung lautet: Zerstörung durch (fremde) außerirdische Intelligenz. Diese Möglichkeit habe ich bereits in **Kapitel 6** angesprochen und halte sie ebenfalls für recht unwahrscheinlich.

GNR: Vorteile und Gefahren in Relation. Somit bleiben die GNR-Techniken unsere Hauptsorge. Ich denke jedoch, dass wir uns genauso in Acht nehmen müssen vor den immer lauter werdenden, fehlgeleiteten ludditischen Forderungen nach einem Verzicht auf technische Entwicklung, um die den GNR-Techniken innewohnenden Gefahren abzuwenden. Aus weiter unten beschriebenen Gründen (siehe **Seite 423**) ist Verzicht keine Antwort, doch rationale Angst kann zu irrationalen Lösungen führen. Verzögerungen der Beendigung menschlichen Leidens haben immer noch schwerwiegende Konsequenzen – ein Beispiel ist die Verschlimmerung der Hungersnot in Afrika durch den Widerstand gegen genmanipulierte Nahrungsmittel.

Ein breiter Verzicht wäre nur in einem totalitären System durchsetzbar – und eine totalitäre schöne neue Welt ist unwahrscheinlich aufgrund der demokratisierenden Wirkung immer besserer dezentraler elektronischer und photonischer Kommunikation. Die Verbreitung weltweiter dezentraler Kommunikation durch Internet und Mobiltelefone hat sich als treibende Kraft der Demokratisierung erwiesen. Nicht dem auf einem Panzer stehenden Boris Jelzin war der Putsch von 1991 gegen Michail Gorbatschow zu verdanken, sondern einem Untergrund-Netzwerk von Faxgeräten, Fotokopierern, Videorekordern und

Heimcomputern, das die Jahrzehnte lang andauernde totalitäre Kontrolle von Informationen unterlief.²⁶ Die

Bewegung zu Demokratie und Kapitalismus, welche, begleitet von wirtschaftlichem Wachstum, die 1990er prägte, ist den beschleunigenden Kräften dieser Kommunikationstechniken zu verdanken.

Es gibt andere Fragen, die zwar nicht existenziell, aber dennoch von großer Bedeutung sind, beispielsweise: „Wer steuert die Nanobots?“ Und: „Wem berichten die Nanobots?“ In der Zukunft könnten Organisationen (ob Regierungen oder Extremistengruppen) oder auch findige Einzelpersonen die Wasser- und Nahrungsmittelversorgung eines ganzen Volkes mit Billionen von getarnten Nanobots versehen. Diese Spione könnten Gedanken und Handlungen beobachten, beeinflussen und sogar steuern. Außerdem könnten existierende Nanobots durch Software-Viren und Hacking-Techniken manipuliert werden. Wenn in unseren Körpern und Gehirnen Software am Werk ist (eine Schwelle, die manche Menschen wie besprochen schon überschritten haben), so erhalten Privatsphäre und Softwaresicherheit einen neuen Stellenwert – man wird neue Überwachungsmethoden entwickeln, um ein ungewolltes Eindringen zu verhindern.

Die Unausweichlichkeit einer veränderten Zukunft. Die diversen GNR-Techniken schreiten an mehreren Fronten voran. Ihre volle Entfaltung wird sich in Hunderten von kleinen, für sich genommen harmlosen Schritten vollziehen. Mit G haben wir bereits die Schwelle zu künstlich konzipierten Krankheitserregern überschritten. Der Fortschritt der Biotechnik wird sich weiter beschleunigen, getrieben von den überzeugenden ethischen und wirtschaftlichen Vorteilen, welche eine Beherrschung biologischer Informationsprozesse mit sich bringt.

Nanotechnik ist das unausweichliche Endergebnis der zunehmenden Miniaturisierung aller Arten von Technik. Die Strukturgrößen in einer Vielzahl von Bereichen – einschließlich Elektronik, Mechanik, Energie und Medizin – schrumpfen mit jedem Jahrzehnt ungefähr um Faktor vier. Außerdem wachsen auch die Forschungsbemühungen für Nanotechnik und ihre Anwendungen exponentiell (siehe die Diagramme zu Nanoforschung und -patenten auf den **Seiten 80 und 81**).

Das Reverse Engineering des Gehirns ist ebenfalls motiviert durch die Aussicht auf diverse Vorteile, beispielsweise das Verständnis und die Heilung von geistigen Krankheiten und Degenerationserscheinungen. Die räumliche und zeitliche Auflösung der Instrumente, die uns Einblicke ins Gehirn verschaffen, steigt exponentiell, und wir haben uns als fähig erwiesen, anhand von Daten aus

Gehirnscans und Untersuchungen funktionierende Modelle und Simulationen zu erarbeiten.

Erkenntnisse aus diesen Gehirnuntersuchungen, die Erforschung von KI-Algorithmen und das ungebremste exponentielle Wachstum der Rechnertechnik machen starke KI (die das Intelligenzniveau von Menschen erreicht und übersteigt) unausweichlich. Sobald KI ein menschliches Niveau erreicht, kann sie es auch übersteigen, da sie die Stärken menschlicher Intelligenz mit der Geschwindigkeit, Speicherkapazität und Kommunikativität nichtbiologischer Intelligenz kombinieren kann. Im Gegensatz zu biologischer Intelligenz kann nichtbiologische Intelligenz auch von den exponentiellen Verbesserungen in Größe, Kapazität und Preis-Leistung profitieren.

Totalitäre Unterbindung. Der einzige denkbare Weg, den beschleunigenden Fortschritt an allen Fronten zu stoppen, wäre die Entscheidung eines weltweiten totalitären Regimes, sich von der Idee des Fortschritts an sich zu verabschieden. Selbst dadurch würden die Gefahren von GNR vermutlich nicht gebannt werden, da die resultierende Untergrundaktivität zur destruktiven Anwendung dieser Techniken tendieren würde – während die Verantwortlichen für die Entwicklung von Abwehrtechniken keinen Zugang zu den nötigen Mitteln hätten. Glücklicherweise ist ein solches totalitäres System dank der demokratisierenden Wirkung der Wissensdezentralisierung unwahrscheinlich.

Wie wir uns wappnen

Ich glaube, dass Technik heute und in Zukunft überwiegend kreativ und konstruktiv eingesetzt wird. Wir werden jedoch deutlich stärker in die Entwicklung von Abwehrtechnik investieren müssen. Wie besprochen befinden wir uns in der kritischen Phase der Biotechnik, und bald werden wir uns in einer Phase wiederfinden, in der wir Abwehrmaßnahmen für Nanotechnik entwickeln müssen.

Wir müssen nicht in die Zukunft blicken um die miteinander verwobenen Vorteile und Gefahren des technischen Fortschritts zu erkennen. Man stelle sich vor, wir könnten den Menschen von vor 200 Jahren die Gefahren der heutigen Zeit (zum Beispiel Atombomben) schildern. Vermutlich würden sie es für völligen Wahnsinn halten, solche Risiken einzugehen. Doch wie viele Menschen im Jahr 2005 würden wirklich lieber das kurze, brutale, von Krankheiten und Armut geprägte Leben führen, das vor einigen Jahrhunderten noch 99 Prozent der Menschheit fristeten?²⁷

Wir romantisieren gerne die Vergangenheit, doch bis vor nicht allzu langer Zeit lebten die Menschen ein äußerst zerbrechliches Leben, in dem ein wenig Pech im Alltag völliges Verderben bedeuten konnte. Vor zweihundert Jahren lag die Lebenserwartung von Frauen im damaligen Rekordland Schweden bei fünfunddreißig Jahren – im Vergleich dazu leben japanische Frauen heute im Schnitt fast fünfundachtzig Jahre. Die Lebenserwartung von Männern betrug etwa dreiunddreißig Jahre, während sie in den heute führenden Ländern bei neunundsiebzig liegt.²⁸ Man verbrachte den halben Tag damit, das Abendessen zuzubereiten, und schwere körperliche Arbeit gehörte zum Alltag. Es gab keine sozialen Auffangnetze. Ein beträchtlicher Teil der Menschheit lebt noch heute in solchen Verhältnissen – ein guter Grund, den technischen Fortschritt und das damit verbundene Wirtschaftswachstum aufrechtzuerhalten. Nur durch Technik, welche Leistung und Kosten um ganze Größenordnungen verbessert, können wir die Probleme der heutigen Gesellschaft – wie Armut, Krankheit und Umweltverschmutzung – lösen.

Die meisten Leute durchlaufen bei der Auseinandersetzung mit dem technischen Potenzial der Zukunft drei Phasen: Freude und Staunen darüber, dass uralte Probleme endlich gelöst werden können; Beunruhigung über die Gefahren, welche die neue Technik mit sich bringt; gefolgt von der Einsicht, dass der einzig verantwortungsvolle Weg, der sich uns bietet, ein vorsichtiges Voranschreiten ist – das heißt, dass wir versuchen müssen, den Nutzen zu ernten und dabei die Gefahren zu bändigen.

Wir haben fraglos bereits die Kehrseite der Technik erfahren: Kriege brachten Tod und Zerstörung. Die grobschlächtigen Techniken der ersten industriellen Revolution haben viele Arten verdrängt, die noch vor einem Jahrhundert auf unserem Planeten lebten. Unsere zentralisierten technischen Anlagen (beispielsweise Gebäude, Städte, Flugzeuge und Kraftwerke) sind erwiesenermaßen unsicher.

In der Vergangenheit kam es immer wieder zum Einsatz oder zur Androhung des Einsatzes von „ABC-Waffen“ (atomare, biologische und chemische Waffen).²⁹ Durch die weitaus mächtigeren GNR-Techniken entstehen neue, schwere lokale Bedrohungen und Existenzbedrohungen. Wenn wir die Bedrohung durch genmanipulierte künstliche Krankheitserreger, gefolgt von unkontrolliert replizierenden Nanobots überstehen sollten, so werden wir es als nächstes mit Robotern zu tun haben, deren Intelligenz der unseren Konkurrenz macht, und die uns letztlich überflügeln werden. Solche Roboter werden sicherlich großartige Assistenten sein, doch wer sagt uns, dass sie uns (den rein biologischen Menschen) immerzu freundlich gesonnen sein werden?

Starke KI. Starke KI verspricht die exponentiellen Entwicklungen der menschlichen Zivilisation weiterzutragen. (Wie zuvor besprochen betrachte ich die von unserer Zivilisation hervorgebrachte nichtbiologische Intelligenz als weiterhin menschlich). Doch sie bringt – eben aufgrund der Intelligenzzunahme – auch ernste Gefahren mit sich. Intelligenz ist inhärent unkontrollierbar, weshalb die diversen Sicherheitsmechanismen, die man für die Nanotechnik erdacht hat (zum Beispiel die Broadcast-Architektur), hier nicht greifen. Es gibt Überlegungen, die KI-Entwicklung in Richtung Eliezer Yudkowskys „gutartiger KI“ zu lenken³⁰ (siehe den Abschnitt

„Schutz vor ‚böartiger‘ starker KI“ auf [Seite 433](#)). Dies ist guter Diskussionsstoff, doch es ist unmöglich, heute Strategien zu finden, die garantieren, dass zukünftige KI menschliche Ethik und Werte verfolgt.

Zurück zur Vergangenheit? Bill Joy schildert in seinen Schriften und Vorträgen anschaulich die Pestepidemien vergangener Jahrhunderte – und wie selbstreplizierende Techniken, beispielsweise mutierte künstliche Erreger oder Nanobots, Amok laufen und die lang vergessene Zeit der Seuchen wieder aufleben lassen könnten. Joy erkennt an, dass technische Entwicklungen wie Antibiotika und verbesserter Hygiene uns von solchen Epidemien befreit haben und daher fortsetzenswert sind. Das Leiden in der Welt erfordert unsere uneingeschränkte Aufmerksamkeit. Sollen wir den Millionen von Menschen, die an Krebs oder anderen schweren Krankheiten leiden, etwa erzählen, dass wir die komplette Forschung an biotechnischen Heilverfahren einstellen, weil diese Technik eines Tages zu böartigen Zwecken missbraucht werden könnte? Indem ich diese rhetorische Frage gestellt habe, wurde mir klar, dass es Bewegungen gibt, die genau dieses Ziel verfolgen, doch die meisten Leute würden vermutlich zustimmen, dass ein breiter Verzicht auf Technik nicht die Lösung sein kann.

Die immer neuen Möglichkeiten, Menschen in Not zu helfen, sind ein Hauptgrund für den anhaltenden technischen Fortschritt. Ebenfalls verlockend ist der wirtschaftliche Profit, der in den kommenden Jahrzehnten noch deutlich steigen wird. Die andauernde Beschleunigung der vielen ineinander verwobenen Techniken wird uns goldgepflasterte Straßen bereiten. (Plural, denn technische Entwicklung ist mehr als ein einzelner Weg). Im wirtschaftlichen Wettbewerb ist das Beschreiten dieser Straßen ein ökonomischer Imperativ. Der Verzicht auf technischen Fortschritt wäre für Einzelpersonen, Firmen und Nationen gleichermaßen wirtschaftlicher Selbstmord.

Die Idee der Regulation

Die großen Weiterentwicklungen der Zivilisation machen nichts anderes, als die Zivilisationen, in denen sie sich zutragen, zu zertrümmern.

Dies bringt uns zur Regulation der technischen Entwicklung – eine umstrittene Idee, die unter anderem von Bill McKibben vertreten wird. Ich denke, dass eine Drosselung im richtigen Maße eine verantwortungsvolle und konstruktive Antwort auf künftige Bedrohungen sein kann. Die Frage lautet jedoch, was *ist* das richtige Maß?

Ginge es nach Ted Kaczynski, der als der erste Unabomber bekannt wurde, so müssten wir auf jegliche Technik verzichten.³¹ Dies ist weder wünschenswert noch praktikabel, und diese Position wird in ihrer Sinnlosigkeit nur noch übertroffen von Kaczynskis bedauernswerten Versuchen, sie durchzusetzen.

Dennoch argumentieren auch andere, besonnenere Personen für einen breitangelegten Verzicht auf Technik. McKibben vertritt die Ansicht, dass wir bereits über genug Technik verfügen, und dass von weiterem Fortschritt abgesehen werden sollte. In seinem letzten Buch, *Enough: Staying Human in an Engineered Age*, vergleicht er Technik metaphorisch mit Bier: „Ein Bier ist gut, zwei Bier sind vielleicht noch besser; acht Bier, und man wird es ziemlich sicher bereuen.“³² Diese Metapher geht jedoch an der Sache vorbei und ignoriert das viele Leid in der Welt, das wir durch weiteren wissenschaftlichen Fortschritt beenden können.

Zwar kann man die Nutzung moderner Technik (so wie alles andere) übertreiben, doch der Sinn technischen Fortschritts besteht nicht allein darin, jedem Menschen ein viertes Handy und die doppelte Menge Spam-Mails zu bescheren. Es geht dabei vielmehr auch um die Perfektionierung von Techniken zur Bekämpfung von Krebs und anderen schlimmen Krankheiten, um die Schaffung von allgemeinem Wohlstand und die Beseitigung der Armut, um die Säuberung der Umwelt von den Folgen der ersten industriellen Revolution (ein von McKibben benanntes Ziel) und um die Lösung anderer uralter Probleme.

Breitangelegter Verzicht. Eine andere Form von Regulation wäre das Vermeiden von Entwicklungen auf bestimmten Gebieten wie der Nanotechnik, die als zu gefährlich gelten. Doch solche Einschnitte in die Wissenschaft sind ebenso wenig haltbar. Wie zuvor beschrieben ist

Nanotechnik lediglich das unausweichliche Resultat einer fortlaufenden Tendenz zur Miniaturisierung, die sich durch das komplette Spektrum der Technik zieht. Sie ist bei weitem kein großes, zentralisiertes Projekt, sondern das Ergebnis unzähliger kleiner Projekte mit unterschiedlichen Zielen.

Jemand hat geschrieben:

Ein weiterer Grund, weshalb die Industriegesellschaft nicht reformiert werden kann [...], ist, dass moderne Technik ein ganzheitliches System ist, in dem alle Teile voneinander abhängen. Man kann nicht die „schlechten“ Teile der Technik über Bord werfen und die „guten“ Teile behalten. Nehmen wir zum Beispiel die moderne Medizin. Medizinischer Fortschritt ist abhängig von Fortschritten in Chemie, Physik, Biologie, Informatik und anderen Gebieten. Moderne medizinische Behandlungen erfordern teure High-Tech-Ausrüstung, die nur von einer sich technisch weiterentwickelnden, wirtschaftlich reichen Gesellschaft bereitgestellt werden kann. Es ist offensichtlich, dass man in der Medizin ohne das komplette technische System und allem, was dazugehört, nicht weiterkommt.

Dieses Zitat stammt wiederum von Ted Kaczynski.³³ Seine Äußerungen sind im Allgemeinen sicherlich mit Vorsicht zu genießen, doch was die enge Verstrickung von Nutzen und Risiken der Technik betrifft, hat er meines Erachtens recht. Doch spätestens bei der Abwägung zwischen diesen Vor- und Nachteilen scheiden sich unsere Geister. Bill Joy und ich stehen seit einiger Zeit öffentlich und privat im Dialog über dieses Thema und wir sind beide der Ansicht, dass der Fortschritt weitergehen soll und wird, und dass wir uns aktiv mit seinen Schattenseiten befassen müssen. Die größte Herausforderung besteht darin, die Entwicklung in einem wünschenswerten und realistischen Maß zu regulieren.

Wohldosierte Regulation. Ich denke, dass ein ausgewogenes Maß an Regulation die ethisch richtige Reaktion auf die Gefahren der Technik des einundzwanzigsten Jahrhunderts ist. Ein konstruktives Beispiel sind die ethischen Richtlinien des Foresight Institute, nach denen Nanotechniker sich verpflichten würden, keine physikalischen Mechanismen zu entwickeln, die sich in einer natürlichen Umgebung selbstständig vermehren können.³⁴ Meiner Ansicht nach gibt es dabei zwei Ausnahmen. Zum einen werden wir irgendwann ein planetenweites nanotechnisches Immunsystem benötigen (in der Natur verstreute Nanobots als Schutz gegen andere, bösartige, selbstreplizierende Nanobots). Robert Freitas und ich

haben darüber diskutiert, ob ein solches Immunsystem seinerseits selbstreplizierend sein muss. Freitas schreibt: „Ein flächendeckendes Überwachungssystem mit einigen vorinstallierten Ressourcen – einschließlich hoch leistungsfähiger Nanofabriken, die bei Bedarf große Mengen nichtreplizierender Abwehreinheiten gegen spezifische Bedrohungen produzieren können – sollte ausreichend sein.“³⁵

Ich stimme zu, dass in der Anfangsphase ein vorinstalliertes Immunsystem mit der Möglichkeit, die Abwehrkräfte zu verstärken, genügen dürfte. Doch wenn sich starke KI mit Nanotechnik vermischt und nanotechnische Einheiten an Vielfalt und Komplexität gewinnen, werden meines Erachtens Abwehrkräfte nötig sein, die sich vor Ort schnell selbst vermehren können. Außerdem gehe ich davon aus, dass für die Erkundung von Planeten jenseits des Sonnensystems selbstreplizierende Nanosonden benötigt werden.

Ein anderes gutes Beispiel für sinnvolle Richtlinien wäre ein Verbot von selbstreplizierenden physischen Einheiten, die ihren eigenen Bauplan enthalten. In einer sogenannten „Broadcast-Architektur“^{*} (die Bezeichnung stammt von Ralph Merkle) würde der Code für die Selbstreplikation in einem sicheren zentralen Server verwahrt und an die Einheiten übertragen – so würde einer unzuverlässigen Replikation vorgebeugt.³⁶ Eine Broadcast-Architektur ist in der biologischen Welt nicht möglich, in dieser Hinsicht könnte Nanotechnik also sogar sicherer gestaltet werden als Biotechnik. Hinsichtlich anderer Aspekte ist Nanotechnik jedoch potenziell gefährlicher, da Nanobots deutlich stärker und intelligenter sein können als proteinbasierte Systeme.

Wie in **Kapitel 5** beschrieben können wir durch Nanotechnik auch Broadcast-Architekturen für biologische Systeme schaffen. Jeder Zellkern würde dabei durch einen Nanocomputer ergänzt oder ersetzt, welcher den DNS-Code bereitstellt. Ein Nanobot mit einer ribosomartigen molekularen Maschinerie würde anhand dieses Codes Aminosäureketten produzieren. (Ribosomen sind die Moleküle, welche die Basenpaare der mRNS außerhalb des Zellkerns interpretieren). Da wir diese Nanocomputer per Funkübertragung fernsteuern würden, könnten wir jederzeit unerwünschte Replikationen unterbinden – es gäbe also keinen Krebs mehr. Wir könnten

je nach Bedarf Proteine zur Bekämpfung von Krankheiten produzieren. Und wir könnten Genfehler korrigieren und unsere DNS upgraden. Ich werde später noch näher auf die Stärken und Schwächen der Broadcast-Architektur eingehen.

Umgang mit Missbrauch. Übermäßige Regulation ist wirtschaftlich kontraproduktiv und ethisch nicht tragbar, angesichts der Möglichkeit Krankheiten zu heilen, Armut zu beenden, die Umwelt zu säubern – und wie zuvor besprochen würden die Gefahren dadurch nur verschärft. Sicherheitsrelevante – das heißt wohldosierte – Regulationen sind jedoch angebracht.

Wir müssen jedoch auch die Regulationsprozesse optimieren. In den USA verzögert die FDA-Freigabe medizinische Techniken um fünf bis zehn Jahre. (Die Situation in anderen Ländern ist vergleichbar). Der durch die Verzögerung lebensrettender Behandlungen verursachte Schaden (zum Beispiel eine Million Tote in den USA mit jedem Jahr, um das sich Behandlungen für Herzkrankheiten verzögern) wird gegenüber den potenziellen Risiken neuer Therapien sehr gering bewertet.

Weitere Schutzmaßnahmen sind Kontrollen durch Regulationsinstitutionen, die Entwicklung von „Immunsystemen“ für verschiedene Technikbereiche und computergestützte Überwachung durch Vollzugsbehörden. Vielen ist nicht bewusst, dass unsere Behörden bereits moderne Techniken wie zum Beispiel Filterung nach Schlüsselwörtern einsetzen, um eine große Masse an Telefon-, Kabel-, Satelliten- und Internet-Gesprächen zu überwachen. Eine der wichtigsten Aufgaben in Zukunft wird sein, die richtige Balance zwischen Recht auf Privatsphäre und Schutz vor Missbrauch der Technik des einundzwanzigsten Jahrhunderts zu finden. Dies ist der Grund, weshalb Themen wie „Falltüren“ in Verschlüsselungen (durch welche Vollzugsbehörden Zugang zu ansonsten geheimen Informationen haben) und das E-Mail-Überwachungssystem „Carnivore“ des FBI so umstritten sind.³⁷

Anlass zur Hoffnung gibt unser Erfolg im Umgang mit einer technischen Herausforderung in der jüngeren Vergangenheit. Die Rede ist von einer Art von nichtbiologischen, selbstreplizierenden Einheiten, die vor einigen

Jahrzehnten noch nicht existierte: dem Computervirus. Als die ersten dieser zerstörerischen Eindringlinge auftauchten wurde befürchtet, zukünftige, verbesserte Computerviren könnten das Computernetz zerstören, in dem sie leben. Das „Immunsystem“, das in Reaktion auf diese Bedrohung entstanden ist, war jedoch weitgehend erfolgreich. Zwar entstehen in der Tat gelegentlich Schäden durch destruktive selbstreplizierende Software, doch sie machen nur einen Bruchteil der Vorteile aus, die uns die Computer und Kommunikationsverbindungen bringen, auf denen sie basieren.

Man könnte entgegnen, Computerviren wären im Gegensatz zu biologischen Viren oder destruktiver Nanotechnik nicht tödlich. Doch das ist nicht unbedingt richtig: Software steuert unsere Notrufzentralen, überwacht Patienten in kritischem Zustand, fliegt und landet Flugzeuge, lenkt Waffen im Kriegseinsatz, führt unsere Finanztransaktionen aus, verwaltet öffentliche Einrichtungen und erfüllt viele weitere Aufgaben von kritischer Bedeutung. Doch auch die Annahme, dass Computerviren keine tödliche Bedrohung darstellen, spricht für mein Argument, denn das würde nur bedeuten, dass die Hemmschwelle, solche Viren zu programmieren und zu verbreiten, geringer ist. Die meisten Programmierer von Viren würden es sich wahrscheinlich anders überlegen, wenn sie davon ausgehen würden, dass ihre Viren Menschenleben gefährden. Zudem würden wir – unter der Annahme, dass Computerviren nicht tödlich sind – deutlich weniger Aufwand betreiben, um sie zu bekämpfen. Die Bedrohung durch potenziell in großem Maßstab tödliche selbstreplizierende Nanotechnik werden wir hingegen sehr ernst nehmen.

Computerviren sind zwar nicht völlig aus der Welt, stellen jedoch zumeist nur geringfügige Störfaktoren dar. Selbst in einer weitgehend unregulierten Industrie mit relativ wenigen Qualitätsstandards ist es uns also gelungen, eine solche Bedrohung einzudämmen. Die weitgehend unregulierte Computerindustrie ist zudem enorm produktiv. Man könnte behaupten, dass sie mehr zu unserem technischen und wirtschaftlichen Fortschritt beigetragen hat als jedes andere Unternehmen in der Geschichte der Menschheit.

Doch der Kampf gegen Computerviren und Schadsoftware aller Art wird niemals enden. Wir werden immer abhängiger von kritischen

Softwaresystemen und das destruktive Potenzial von immer raffinierteren selbstreplizierenden Softwarewaffen wird weiter steigen. Und schließlich, wenn Software in unseren Körpern und Gehirnen zum Einsatz kommt und unser weltweites Immunsystem steuert, wird unermesslich viel auf dem Spiel stehen.

Bedrohung durch Fundamentalismus. Die Welt hat mit einer besonders schädlichen Form von religiösem Fundamentalismus zu kämpfen, und zwar mit radikalislamistischem Terrorismus. Es mag zwar scheinen, als wäre Zerstörung das einzige Ziel dieser Terroristen, sie haben jedoch eine Agenda, die über die Interpretation antiker Schriften hinausgeht: Sie richtet sich gegen moderne Ideen wie Demokratie, Menschenrechte und Bildung.

Religiöser Extremismus ist jedoch nicht die einzige Form von reaktionärem Fundamentalismus. Zu Beginn dieses Kapitels steht ein Zitat von Patrick Moore, welches seine Enttäuschung über die von ihm mitbegründete Greenpeace-Bewegung zum Ausdruck bringt. Greenpeace verlor Moores Unterstützung aufgrund der völligen Ablehnung von Golden Rice, einer genmanipulierten Reissorte, die mehr Beta-Carotin (eine Vitamin-A-Vorstufe) enthält.³⁸ Hunderte Millionen von Menschen in Afrika und Asien leiden an Vitamin-A-Mangel, eine halbe Million Kinder erblindet jährlich daran und Millionen andere leiden an anderen Mangelkrankungen. Etwa dreihundert Gramm Golden Rice würden ausreichen, um den Vitamin-A-Bedarf eines Kindes zu decken. Zahlreiche Studien belegen, dass die Pflanze – so wie viele andere genetisch veränderte Organismen (GVOs) – ungefährlich ist. Im Jahr 2001 veröffentlichte die Europäische Kommission einundachtzig Studien, die zu dem Schluss kommen, dass GMOs „keine neuen Risiken für menschliche Gesundheit und Umwelt jenseits der üblichen Unsicherheiten konventioneller Pflanzenzucht aufgewiesen haben. Tatsächlich sind sie aufgrund präziserer Technik und stärkerer regulatorischer Beobachtung sogar sicherer als konventionelle Pflanzen und Nahrungsmittel.“³⁹

Ich vertrete keinesfalls die Ansicht, alle GMOs seien inhärent harmlos – natürlich muss jedes Produkt eingehenden Sicherheitsüberprüfungen unterzogen werden. Doch die Anti-GMO-Bewegung geht davon aus, dass

jeder GVO von Natur aus gefährlich ist – eine Position, die jeglicher wissenschaftlicher Grundlage entbehrt.

Die Verfügbarkeit von Golden Rice wurde auf Druck von Greenpeace und anderen GVO-Gegnern um mindestens fünf Jahre aufgeschoben. Moore mahnt, diese Verzögerung werde Millionen weiterer Kinder das Augenlicht kosten, während die Gegner drohten, „den GV-Reis aus den Äckern zu rupfen, falls Bauern es wagen, ihn zu pflanzen.“ Auch wurden afrikanische Staaten bedrängt, genetisch veränderte Nahrungsmittelhilfen und Saatgut abzulehnen, was die Hungersnot verschlimmert hat.⁴⁰ Letztendlich werden sich Techniken wie GVOs mit ihrem nachweislichen Potenzial, große Probleme zu lösen, durchsetzen – dennoch verursachen durch irrationalen Protest bewirkte temporäre Verzögerungen unnötiges Leid.

Bestimmte Fraktionen der Umweltbewegung haben sich einem fundamentalistischen Ludditentum verschrieben – „fundamentalistisch“ aufgrund ihrer törichten Versuche, die Dinge so zu erhalten, wie sie sind (oder waren); „Ludditentum“ aufgrund ihrer reaktionären Haltung gegenüber technischen Lösungen für kritische Probleme. Ironischerweise könnten gerade durch GVOs Umweltbelastungen durch Spritzmittel vermieden werden, da die künstlichen Sorten oft mit Resistenzen gegen Befall durch Insekten und andere Schädlinge ausgestattet werden.

Meine Bezeichnung als „fundamentalistische Ludditen“ ist somit eigentlich redundant, da Ludditentum inhärent fundamentalistisch ist. Es beruht auf der Idee, dass die Menschheit ohne Veränderungen und ohne Fortschritt besser dran wäre. Das bringt uns wieder auf die Idee des breitangelegten Verzichts – welche denselben Kreisen entstammt, die auch die ludditische Fraktion der Umweltbewegung ausmachen.

Fundamentalistischer Humanismus. Indem die G- und N-Techniken beginnen, unseren Körper und unser Gehirn zu verändern, regt sich noch eine andere Form von Fortschrittswiderstand: „fundamentalistischer Humanismus“ – dass heißt, Ablehnung von Eingriffen, die dem bisherigen Menschheitsverständnis widersprechen (beispielsweise Genmanipulation und andere Schritte, die zu einer radikalen Lebensverlängerung führen).

Doch auch diese Bemühungen werden letztlich vergebens sein, da moderne Therapien die unwiderstehliche Möglichkeit bieten werden, das Leiden, die Krankheit und die kurze Lebensdauer unseres Körpers der Version 1.0 zu überwinden.

Technik allein – insbesondere GNR – wird uns letztendlich ermöglichen, all die Probleme auszuhebeln, mit denen die menschliche Zivilisation seit vielen Generationen zu kämpfen hat.

Entwicklung von Schutztechniken und die Auswirkungen von Regulationen

Einer der Gründe, weshalb die Rufe nach breitangelegtem Verzicht Anklang finden, liegt darin, dass sie das Bild zeichnen, die Gefahren der Zukunft würden in einer Welt entfesselt, die der heutigen gleicht und die dementsprechend unvorbereitet ist. Doch in Wirklichkeit werden nicht nur die Gefahren wachsen, sondern auch die Raffinesse und die Leistungsfähigkeit unserer Abwehrtechniken. Der Grauen Schmiere (unkontrollierte Nanobotvermehrung) wird eine „Blaue Schmiere“ gegenüberstehen (eine „Nanobot-Polizei“, die die „bösen Nanobots“ bekämpft). Natürlich lässt sich nicht garantieren, dass wir jeglichem Missbrauch vorbeugen können. Doch ein breiter Verzicht auf ganze Forschungsbereiche wäre ein sicherer Weg, die Entwicklung effektiver Abwehrtechnik zu verhindern. Die Verbreitung von Computerviren haben wir unter Kontrolle bekommen, weil verantwortungsbewusste Beteiligte breiten Zugang zum nötigen Wissen hatten. Versuche, diesen Zugang zu beschränken, hätten zu einer sehr viel instabileren Situation geführt. Wir hätten nur sehr viel langsamer auf neue Herausforderungen reagieren können, und wahrscheinlich hätte sich das Gleichgewicht in Richtung der Schadsoftware verschoben.

Zwischen der erfolgreichen Eindämmung von Software-Viren und dem zukünftigen Kampf gegen künstliche biologische Viren gibt es einen entscheidenden Unterschied. Wie schon erwähnt ist die Softwareindustrie fast komplett unreguliert – für die Biotechnik gilt das eindeutig nicht.

Während ein Bioterrorist keine Genehmigung der FDA für seine „Erfindungen“ braucht, haben Wissenschaftler bei der Entwicklung von Schutztechniken bestimmte Regeln einzuhalten, was die Innovation konstant verlangsamt. Zudem ist es unter den bestehenden Regulationen und ethischen Standards nicht möglich, Schutztechniken anhand echter bioterroristischer Mittel zu testen. Es wird bereits ausführlich darüber diskutiert, diese Regulationen zu lockern und Tierversuche und Simulationen zuzulassen, wo Versuche mit Menschen nicht infrage kommen. Dies sind nötige Maßnahmen, doch ich glaube wir müssen noch weiter gehen um die Entwicklung von Schutztechniken ausreichend zu beschleunigen.

Es ist an der Politik, schnellstmöglich entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, das heißt, ethische und gesetzliche Richtlinien auszuarbeiten und die Entwicklung von Schutztechniken zu fördern. Es ist ein Wettrennen. Im Softwarebereich konnten Schutztechniken immer schnell auf die Innovationen von Schadsoftware reagieren. In der Medizin dagegen halten strenge Regulationen die Entwicklung zurück, weshalb wir hier nicht so optimistisch sein können wie in der Softwaretechnik. Nach den derzeitigen Regelungen kann die Forschung massiv eingeschränkt werden, wenn ein einziger Mensch in einem Gentherapie-Versuch stirbt.⁴¹ Natürlich sollte biomedizinische Forschung so sicher wie möglich gestaltet werden, doch unsere Risikoabwägung ist völlig aus dem Gleichgewicht. Millionen von Menschen sind dringend auf den Fortschritt von Gentherapie und anderen bahnbrechenden Entwicklungen der Biotechnik angewiesen, doch sie scheinen gegenüber einer Handvoll unvermeidlicher Risiken des Fortschritts wenig politisches Gewicht zu haben.

Dieses Ungleichgewicht erscheint noch gravierender, wenn wir die Bedrohung durch gezielt konzipierte Krankheitserreger in Betracht ziehen. Darum brauchen wir mehr öffentliche Akzeptanz für notwendige Risiken. Eilige Entwicklung von Schutztechniken ist unerlässlich für unsere Sicherheit. In der Biotechnik bedeutet das eine schnelle Entwicklung antiviraler Medikamente. Dazu müssen wir die Regulationsprozesse rationalisieren und gleichzeitig stärker und gezielt in Schutztechniken investieren. Wir werden nicht die Zeit haben, für jede neue Bedrohung, die

auftritt, spezifische Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Wir stehen kurz vor dem Durchbruch mit pauschalen antiviralen Techniken, zum Beispiel RNS-Interferenz – und diese Entwicklung gilt es zu beschleunigen.

Ich spreche vor allem von Biotechnik, da dies die Entwicklungsschwelle und Gefahrenquelle ist, auf die wir uns aktuell zubewegen. Wenn wir uns der Schwelle für selbstorganisierte Nanotechnik nähern, müssen wir auch auf diesem Gebiet in entsprechende Schutztechniken investieren und ein technisches Immunsystem einrichten. Wenn unser biologisches Immunsystem einen Krankheitserreger erkennt, vermehren sich in kurzer Zeit die T-Zellen und andere Immunzellen um den Eindringling zu bekämpfen. Ein nanotechnisches Immunsystem sowohl im Körper als auch in der Umwelt würde sich ähnlich verhalten: Patrouillierende Nanobots würden bösartige selbstreplizierende Nanobots aufspüren und die Bedrohung melden, worauf schnell Abwehr-Nanobots erzeugt würden (letztlich durch Selbstreplikation), welche die Eindringlinge zerstören können.

Bill Joy und andere haben darauf hingewiesen, dass ein solches Immunsystem durch eine „Autoimmunreaktion“ selbst zur Gefahr werden könnte (wenn die Nanobots des Immunsystems die Welt angreifen, die sie eigentlich beschützen sollen).⁴² Dies ist jedoch kein überzeugender Grund, auf ein Immunsystem zu verzichten. Niemand käme aufgrund von Autoimmunerkrankungen auf die Idee, Menschen wären ohne Immunsystem besser bedient. Das Immunsystem kann zwar eine Gefahr sein, doch ohne es würden Menschen nicht länger als ein paar Wochen überleben (außer in extremer Isolation). So oder so wird sich ein Nanotechnik-Immunsystem entwickeln, selbst wenn wir uns nicht gezielt darum bemühen. So geschah es auch in der Softwaretechnik, wo ein Immunsystem gegen Computerviren nicht durch durchgeplante Großprojekte entstand, sondern durch allmähliche Anpassung an die neuen Herausforderungen und die Entwicklung von Heuristiken zur Früherkennung. Ähnliches steht zu erwarten, wenn sich die ersten Bedrohungen durch Nanotechnik abzeichnen. Aufgabe der Politik ist es, diese Entwicklung von Schutztechniken gezielt zu fördern.

Es wäre voreilig, schon heute defensive Nanotechnik entwickeln zu wollen, da wir bisher nur eine grobe Vorstellung haben, mit was für Bedrohungen wir es zu tun haben werden. Dennoch sind bereits fruchtbare Dialoge und Diskussionen über dieses Thema im Gange, und vermehrte Investitionen auf diesem Gebiet wären ratsam. Das Foresight Institute beispielsweise hat, wie zuvor erwähnt, eine Reihe ethischer Richtlinien und Strategien für die Entwicklung sicherer Nanotechnik ausgearbeitet – basierend auf Richtlinien für Biotechnik.⁴³ Als man 1975 mit Gen-Splicing begann, empfahlen die Biologen Max Singer und Paul Berg ein Moratorium, bis man sich mit den damit verbundenen Sicherheitsbedenken befasst hätte. Eine offensichtlich große Gefahr schien der Einbau von Gift produzierenden Genen in gewöhnliche, sich schnell verbreitende Krankheitserreger (zum Beispiel Erkältungsviren) zu sein. Nach einem zehnmonatigen Moratorium beschloss man auf der Asilomar-Konferenz Richtlinien, die bestimmte Arten von Experimenten verbieten und Maßnahmen vorschreiben, die ein Entweichen von experimentellen Organismen aus dem Labor verhindern. Diese Richtlinien wurden strikt befolgt, und so kam es in der dreißigjährigen Geschichte der Biotechnik nicht zu einem einzigen Unfall.

Vor einigen Jahren beschloss die vertretende Organisation der Transplantationschirurgen weltweit ein Moratorium für die Transplantation von durchbluteten Tierorganen auf Menschen. Der Grund dafür war die Befürchtung, dass HIV-ähnliche Viren von Schweinen, Pavianen oder anderen Tieren auf die menschliche Bevölkerung übertragen werden könnten. Unglücklicherweise bleiben durch dieses Moratorium auch Millionen von Menschen, die jedes Jahr an Herz-, Nieren- und Leberversagen sterben, lebensrettende Xenotransplantate (genetisch veränderte Tierorgane, die vom Immunsystem akzeptiert werden) vorenthalten. Die Geoethikerin Martine Rothblatt hat vorgeschlagen, das Moratorium durch neue ethische Richtlinien und Regelungen zu ersetzen.⁴⁴

Im Fall von Nanotechnik hat die Debatte bereits einige Jahrzehnte vor der Verfügbarkeit erster potenziell gefährlicher Anwendungen begonnen. Die wichtigsten Auflagen der Richtlinien des Foresight Institute:

- „Künstliche Replikatoren dürfen nicht in der Lage sein, sich in einer natürlichen, unkontrollierten Umgebung zu vermehren.“
- „Von Evolution im Kontext selbstreplizierender Fertigungssysteme ist abzuraten.“
- „Konzepte für molekulare Nanotechnik sollten gezielt die Verbreitung einschränken und die Verfolgbarkeit von selbstreplizierenden Systemen gewährleisten.“
- „Die Verbreitung von Mitteln zur *Entwicklung* molekularer Nanofertigung sollte wenn möglich auf verantwortungsbewusste Akteure, die diesen Richtlinien zugestimmt haben, beschränkt werden. Für die Endprodukte des Entwicklungsprozesses sind keine solchen Einschränkungen nötig.“

Weitere vom Foresight Institute vorgeschlagene Strategien:

- Replikation sollte auf Materialien angewiesen sein, die nicht in natürlichen Umgebungen vorliegen.
- Die Fertigung (Replikation) sollte von der Funktionalität des Endprodukts getrennt sein. Fertigungsgeräte können Endprodukte erzeugen, sich jedoch nicht selbst replizieren; Endprodukte sollten keine Replikationsfähigkeiten haben.
- Replikation sollte auf verschlüsselte und zeitlich befristete Replikationscodes angewiesen sein. Die zuvor erwähnte Broadcast-Architektur ist ein Beispiel dafür.

Diese Richtlinien und Strategien dürften eine Freisetzung gefährlicher selbstreplizierender nanotechnischer Entitäten verhindern können. Kompliziert wird es jedoch mit internationaler Entwicklung und Vertrieb dieser Entitäten. Ein ausreichend entschlossener Gegner mit zerstörerischen Absichten könnte möglicherweise jede einzelne dieser Schutzebenen durchbrechen. Nehmen wir als Beispiel die Broadcast-Architektur. Bei richtiger Umsetzung ist jede Entität unfähig sich zu replizieren, solange gespeicherte Replikationscodes nicht an die nächste Generation weitergeben werden. Eine Anpassung könnte jedoch verhindern, dass der Replikationscode zerstört wird – nun würde er eben doch weitergegeben. Um dies zu verhindern, wurde vorgeschlagen, die Speicherkapazität für

Replikationscodes so knapp zu bemessen, dass stets nur ein Teil des Codes Platz findet. Diese Maßnahme wiederum könnte durch Vergrößerung des Speichers umgangen werden.

Eine andere vorgeschlagene Schutzmaßnahme besteht darin, die Codes zu verschlüsseln und das Entschlüsselungssystem mit Sicherheitsvorrichtungen auszustatten, beispielsweise zeitliche Befristungen. Wir wissen jedoch längst, dass sich jeder Kopierschutz von intellektuellem Eigentum (beispielsweise Musikdateien) irgendwie umgehen lässt: Sobald Replikationscodes und die verschiedenen Schutzebenen geknackt sind, lässt sich die Information uneingeschränkt kopieren.

Dies bedeutet nicht, dass gar kein Schutz möglich ist. Doch jede Schutzebene hält nur einem gewissen Maß an Raffinesse stand. Die Quintessenz lautet, dass unsere höchste Priorität im einundzwanzigsten Jahrhundert auf der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Schutztechniken liegen muss, damit wir destruktiven Techniken stets einen oder mehrere Schritte voraus sein können (oder zumindest nicht mehr als einen kleinen Schritt hinterher).

Schutz vor „böartiger“ starker KI. Mechanismen wie die Broadcast-Architektur können uns jedoch nicht vor dem Missbrauch starker KI schützen. Die Einschränkung durch die Broadcast-Architektur stützt sich auf die mangelnde Intelligenz nanotechnischer Entitäten. Intelligente Entitäten jedoch besitzen definitionsgemäß die Cleverness, um solche Einschränkungen zu umgehen.

Eliezer Yudkowsky hat sich ausführlich mit Prinzipien, Architekturen und ethischen Regeln befasst, die helfen könnten zu gewährleisten, dass starke KI, die in der Lage ist, ihren eigenen Aufbau zu verändern, biologischen Menschen freundlich gesonnen bleibt und menschliche moralische Werte vertritt. Da selbstverbessernde KI eine unwiderrufliche Entwicklung darstellt, müssen wir, so Yudkowsky, „auf den ersten Anlauf alles richtig machen“ und der erste Entwurf darf „keinerlei nicht behebbare Fehler enthalten“.⁴⁵

Gegen starke KI gibt es inhärent keinen absoluten Schutz. Ich glaube allerdings, dass eine freie Marktwirtschaft mit konstantem wissenschaftlichem und technischem Fortschritt, in dem jeder Schritt von Marktakzeptanz bestimmt ist, eine konstruktive Umgebung für die Entstehung von Technik, die menschliche Werte verkörpert, darstellt. Wie zuvor beschrieben wird sich starke KI aus einer Vielzahl von Einzelleistungen ergeben und tief in der Infrastruktur unserer Zivilisation – und sogar in unseren Körpern und Gehirnen – verankert sein. Sie wird unsere Werte verkörpern, weil sie mit uns eins sein wird. Versuche, diese Techniken durch geheime Programme der Regierung zu kontrollieren, und die dadurch ausgelösten Untergrundaktivitäten, würden nur zu Instabilität führen, wodurch die gefährlichen Anwendungsformen der Technik leichter überhandnehmen könnten.

Dezentralisierung. Eine bedeutende Entwicklung, die längst im Gange ist und für mehr Stabilität sorgen wird, ist der Übergang von zentralisierter zu verteilter Technik und von der realen zur virtuellen Welt. Zentralisierte Technik führt zur Aggregation von Ressourcen, das heißt von Menschen (in Städten und Gebäuden), Energie (in Atomkraftwerken, Flüssiggas- und Öltankern und Pipelines), Transport (Flugzeuge, Züge) und so weiter. Zentralisierte Technik ist tendenziell ineffizient, verschwenderisch und umweltschädlich.

Verteilte Technik dagegen ist flexibel, effizient und relativ umweltfreundlich. Das Musterbeispiel für verteilte Technik ist das Internet. Bis zum heutigen Tag gab es keine größeren Ausfälle des Internets, und indem es immer weiter wächst nehmen auch seine Stabilität und Belastbarkeit weiter zu. Wenn ein Hub oder Übertragungskanal zusammenbricht, finden die Informationen einfach einen anderen Weg.

Dezentrale Energieversorgung. Was Energie betrifft, müssen wir uns wegbewegen von den extrem konzentrierten und zentralisierten Einrichtungen, von denen wir heute abhängig sind. Es gibt bereits ein Unternehmen, das mikroskopisch kleine Brennstoffzellen auf MEMS-Basis herstellt.⁴⁶ Diese werden wie elektronische Chips gefertigt, sind jedoch

Energiespeicher mit einer deutlich höheren Speicherdichte als konventionelle Techniken. Wie zuvor besprochen werden nanogefertigte Solarmodule eine dezentrale, erneuerbare und saubere Stromversorgung gewährleisten. Letztlich wird alles, von Handys über Autos bis zu Häusern, Energie über solche Techniken beziehen. Eine solche Energieversorgung wäre nie vom Ausfall bedroht und kann auch keine Katastrophen verursachen.

Bürgerliche Freiheit in Zeiten asymmetrischer Kriegsführung.

Terroristische Angriffe und die Philosophien der dahinterstehenden Organisationen zeigen deutlich, dass bürgerliche Freiheiten mit legitimen staatlichen Überwachungs- und Kontrollbestrebungen in Konflikt geraten können. Unser Vollzugssystem – und ein großer Teil unseres Sicherheitsdenkens – basiert auf der Annahme, dass Menschen versuchen, ihr eigenes Leben und Wohlergehen zu erhalten. All unsere Strategien, von Personenschutz auf lokaler Ebene bis zur nuklearen Abschreckung auf globaler Ebene, beruhen auf dieser Logik. Doch einem Gegner, der für die Zerstörung seiner Feinde die eigene Vernichtung in Kauf nimmt, ist damit nicht beizukommen.

Die Konfrontation mit einem Gegner, dem nichts an seinem eigenen Leben liegt, ist zutiefst beunruhigend und hat zu inneren Konflikten geführt, die sich mit wachsenden Gefahren noch weiter verschärfen werden. Wenn zum Beispiel das FBI eine mutmaßliche Terrorzelle entlarvt, so werden alle Beteiligten verhaftet, selbst wenn sie noch gar kein Verbrechen begangen haben oder die Beweise nicht ausreichen, um sie zu verurteilen – unter Berufung auf das Kriegsrecht werden diese Leute dennoch weiterhin festgehalten.

Die *New York Times* hat in einem ihrer Leitartikel diese „bedenkliche Vorgehensweise“ kritisiert.⁴⁷ Die Regierung solle die Gefangenen freilassen, da sie, so die Argumentation, noch kein Verbrechen begangen hätten – und wieder festnehmen, wenn sie es getan haben. Doch bis dahin könnte der Verdächtige natürlich längst tot sein, zusammen mit den zahlreichen Opfern seines Attentats. Wie nur können die Obrigkeiten ein weitläufiges Netz von

Terrorzellen zerschlagen, wenn sie immer warten müssen, bis ein Verbrechen begangen wurde?

Andererseits haben sich tyrannische Regimes immer wieder dieser Logik bedient, um rechtliche Schutzmechanismen außer Kraft zu setzen. Zudem lässt sich argumentieren, dass eine Beschneidung unserer Rechte genau das Ziel der Terroristen ist, die unsere Ideen von Freiheit und Pluralismus verabscheuen. Ich sehe jedoch kein technisches Wundermittel, mit dem sich dieses Dilemma lösen ließe.

Ein GNR-Schutzprogramm

Wir stammen im Prinzip vom Goldfisch ab, aber das bedeutet [...] nicht, dass wir uns zurückwenden und alle Goldfische töten. Vielleicht werden [die KIs] uns einmal die Woche füttern. [...] Wenn man eine Maschine hätte, die 10 hoch 18 Mal mehr IQ hat als Menschen, würde man dann nicht wollen, dass sie regiert oder zumindest die Wirtschaft lenkt?

SETH SHOSTAK

Wie können wir sicherstellen, dass der Nutzen von GNR die Risiken wettmacht? Das folgende ist eine Zusammenfassung eines möglichen Programms zur Eindämmung der Gefahren durch GNR:

Die dringendste Handlungsempfehlung lautet, *deutlich mehr in Schutztechniken zu investieren*. Da wir uns bereits in der G-Ära befinden, sollte *die Mehrheit dieser Investitionen in die Entwicklung (biologischer) antiviraler Medikamente und Behandlungen fließen*. Wir verfügen über neue Werkzeuge, die für diese Aufgabe geeignet sind. RNS-Interferenz beispielsweise kann die Genexpression blockieren. Praktisch alle Infektionen (auch Krebs) sind an irgendeinem Punkt auf Genexpression angewiesen.

Auch Bestrebungen, Schutztechniken für N und R vor auszuplanen, sollten gefördert werden, und indem die Verfügbarkeit von molekularer Fertigung und starker KI näher rückt, sollten diese Bemühungen massiv verstärkt werden. Ein bedeutender Nebeneffekt wäre die Beschleunigung effektiver Behandlungen für Infektionskrankheiten und Krebs. Ich habe dieses Thema dem U.S.-Kongress vorgetragen und zur Investition von zehn

Milliarden Dollar im Jahr (weniger als 1 Prozent des BIP) geraten, um uns gegen die neuen, unterschätzten Existenzbedrohungen zu wappnen.⁴⁸

- Die Regulationsprozesse für Gen- und Medizintechnik müssen rationalisiert werden. Die Regulationen verhindern nicht die bösartige Anwendung von Technik, sondern hemmen nur die Entwicklung der nötigen Schutzmaßnahmen. Wie schon erwähnt, müssen wir besser abwägen zwischen den Risiken moderner Technik (zum Beispiel neuer Wirkstoffe) und den bekannten Konsequenzen von Verzögerungen.
- Ein globales Programm zur vertraulichen Untersuchung zufälliger Blutstichproben auf neue oder mutierte Krankheitserreger sollte gegründet werden. Es gibt Diagnosemethoden um unbekannte Proteine oder Gensequenzen schnell zu erkennen. Information ist der Schlüssel zu Sicherheit und eine frühe Erkennung von bevorstehenden Epidemien durch ein solches Programm könnte von unschätzbarem Wert sein. Öffentliche Gesundheitseinrichtungen setzen sich seit vielen Jahren für ein solches „Erreger-Fahndungs-Programm“ ein, bisher fehlte jedoch die Finanzierung.
- Wohldefinierte, gezielte und zeitlich befristete Moratorien in der Art des Genetik-Moratoriums von 1975 könnten von Zeit zu Zeit erforderlich werden. In der Nanotechnik werden solche Moratorien wahrscheinlich nicht nötig sein. Das Drängen auf Einstellung ganzer Forschungszweige vergrößert nur das menschliche Leid durch Verzögerung der positiven Aspekte der Technik, während die Gefahren dabei sogar noch verschärft werden.
- Wir sollten uns weiterhin um ethische Richtlinien und Sicherheitsrichtlinien für die Nanotechnik bemühen. Indem die Zeit molekularer Fertigung näher rückt, werden diese Richtlinien unweigerlich spezifischer und detaillierter.
- Um öffentliche Unterstützung für die genannten Bemühungen zu gewinnen, muss *öffentlich auf die drohenden Gefahren aufmerksam gemacht werden*. Natürlich besteht dabei auch die Gefahr, Panik auszulösen und undurchdachten Anti-Technik-Mandaten in die Hände zu spielen, deshalb müssen wir den Menschen auch die großen Vorteile des Fortschritts nahebringen.

- Die neuen Bedrohungen kennen keine Landesgrenzen – das ist natürlich nichts Neues: Biologische Viren, Computerviren und Langstreckenraketen überqueren diese Grenzen problemlos. *Internationale Kooperation* war entscheidend bei der Eindämmung von SARS und wird auch in Zukunft zunehmend von Bedeutung sein. Globale Organisationen wie die Weltgesundheitsorganisation, welche bei der Koordination der SARS-Bekämpfung mitwirkte, sollten gestärkt werden.
- Ein umstrittenes Politikum sind die Präventivschläge beispielsweise gegen Terroristen mit Zugang zu Massenvernichtungswaffen oder Schurkenstaaten, die solche Terroristen unterstützen. Solche Maßnahmen werden immer umstritten sein, doch ihre potenzielle Notwendigkeit ist nicht zu leugnen. Eine nukleare Explosion kann eine Stadt innerhalb von Sekunden auslöschen. Ein selbstreplizierendes Pathogen, ob biologisch oder nanotechnisch, könnte unsere Zivilisation innerhalb von Tagen oder Wochen zerstören. Wir können mit unseren Gegenmaßnahmen nicht auf die Mobilisierung einer Armee oder andere Demonstrationen von Feindseligkeit warten.
- Es liegt vor allem in der Verantwortung von Behörden und Gesetzgebern, möglichst vielen gefährlichen Entwicklungen vorzubeugen. Dazu müssen jene stets auf die neueste Technik zurückgreifen. Beispielsweise werden vor Ablauf des Jahrzehnts staubkorngroße Geräte für Aufklärungsmissionen verfügbar sein. In den 2020ern wird Software in unseren Körpern und Gehirnen laufen und für Regierungsbehörden wird es unter gewissen Umständen nötig sein, diesen Datenverkehr zu überwachen. Das Potenzial für Missbrauch ist offensichtlich. Wir müssen einen Mittelweg finden, der Katastrophen verhindert und zugleich unsere Privatsphäre und Freiheit erhält.
- In Hinblick auf R-Bedrohungen (böartige starke KI) sind die obengenannten Maßnahmen unzulänglich. Unsere primäre Strategie sollte daher sein, die Wahrscheinlichkeit zu maximieren, dass zukünftige nichtbiologische Intelligenz unsere Werte reflektiert: Freiheit, Toleranz und Respekt vor Wissen und Vielfalt. Am besten erreichen wir das, indem wir diese Werte in der heutigen und zukünftigen Gesellschaft fördern und weiterentwickeln. Das mag

schwammig klingen, und das ist es auch. Doch es gibt keine rein technische Strategie für diesen Bereich, denn größere Intelligenz wird immer Wege finden, Maßnahmen einer geringeren Intelligenz zu umgehen. Die nichtbiologische Intelligenz, die wir schaffen, ist und bleibt Bestandteil unserer Gesellschaft und reflektiert somit unsere Werte. In der transbiologischen Phase wird nichtbiologische Intelligenz tief in biologischer Intelligenz verwurzelt sein. Dadurch werden unsere Fähigkeiten vervielfacht werden, und diese riesigen neuen intellektuellen Kräfte werden von den Werten ihrer Schöpfer geprägt sein. Die transbiologische Phase wird schließlich der postbiologischen weichen, doch es bleibt zu hoffen, dass der Einfluss unserer Werte erhalten bleibt. Diese Strategie ist natürlich alles andere als wasserdicht, doch sie ist das Beste, was wir tun können, um die zukünftige Entwicklung starker KI zu beeinflussen.

Technik wird immer ein zweiseitiges Schwert bleiben. Sie stellt eine große Macht dar, die zu allen möglichen menschlichen Zwecken eingesetzt werden kann. GNR wird uns ermöglichen, alte Probleme wie Krankheit und Armut zu lösen, kann jedoch auch in den Dienst destruktiver Ideologien gestellt werden. Uns bleibt nichts anderes übrig, als unsere Abwehr zu stärken und zugleich menschliche Werte zu fördern – auch wenn es über diese Werte keinen Konsens zu geben scheint.

MOLLY 2004: *Okay, jetzt noch mal das zweite Szenario – wo die bösen Nanobots sich heimlich in der Biomasse verteilen und sich erst vermehren, wenn sie sich auf der ganzen Welt ausgebreitet haben.*

RAY: *Naja, sie würden sich erst in sehr geringer Konzentration verbreiten, sagen wir ein Kohlenstoffatom pro 10^{15} , und wie gesagt die gesamte Biomasse durchsetzen. Das Tempo der räumlichen Ausbreitung wäre dann nicht mehr der limitierende Faktor, wenn sie beginnen sich ernsthaft zu vermehren. Wenn sie die heimliche erste Phase überspringen und sich von einem einzigen Punkt aus verbreiten würden, so würde man die Nanokrankheit schnell erkennen und ihre Ausbreitung wäre relativ langsam.*

MOLLY 2004: *Und was machen wir dagegen? Wenn es zu Phase zwei kommt, bleiben uns ja nur noch neunzig Minuten, oder eigentlich noch weniger, wenn man größere Schäden vermeiden will.*

RAY: *Aufgrund der Natur von exponentiellem Wachstum entsteht der meiste Schaden in den letzten Minuten, aber du hast natürlich recht. Ohne ein nanotechnisches Immunsystem haben wir keine Chance – und wenn der neunzigminütige Zerstörungszyklus begonnen hat, ist es zu spät, ein Immunsystem einzurichten. Ein solches System ist vergleichbar mit dem menschlichen Immunsystem – und wie lange würde ein heutiger Mensch schon ohne Immunsystem überleben?*

MOLLY 2004: *Vermutlich nicht sehr lange. Aber wie soll das Immunsystem böse Nanobots bei einer Konzentration von eins zu eintausend Billionen entdecken?*

RAY: *Dieselbe Situation haben wir ja beim biologischen Immunsystem. Wird auch nur ein einziges fremdes Protein entdeckt, laufen sofort die biologischen Antikörperfabriken an, damit das Immunsystem bereit ist, wenn die Anzahl der Krankheitserreger ein kritisches Level erreicht. Ähnliche Mechanismen werden wir für das Nano-Immunsystem brauchen.*

CHARLES DARWIN: *Und werden sich die Nanobots des Immunsystems selbst replizieren können?*

RAY: *Das müssten sie – sonst hätten sie keine Chance, mit selbstreplizierenden bösartigen Nanobots mitzuhalten. Es gibt auch den Vorschlag, die Biomasse mit einer bestimmten Konzentration von Immun-Nanobots zu bestücken, aber sobald bösartige Nanobots eine signifikant höhere Konzentration erreicht hätten, würde das Immunsystem den Kampf verlieren. Robert Freitas hat nichtreplizierende Nanofabriken vorgeschlagen, die bei Bedarf zusätzliche Immun-Nanobots produzieren. Das genügt wahrscheinlich für den Anfang, aber früher oder später muss das Abwehrsystem zur Selbstreplikation in der Lage sein, um es mit den neuen Bedrohungen aufnehmen zu können.*

CHARLES: *Aber entspricht das nicht genau der ersten Phase einer Nanobot-Attacke? In dem Zwei-Phasen-Szenario wird auch zuerst die Biomasse*

mit Nanobots „bestückt“.

RAY: *Aber die Immun-Nanobots sind programmiert uns zu beschützen, nicht uns zu vernichten.*

CHARLES: *Wenn ich es richtig verstanden habe, so kann Software modifiziert werden.*

RAY: *Du meinst gehackt?*

CHARLES: *Ja, genau. Wenn nun ein Hacker die Software des Immunsystems so verändern würde, dass die Nanobots sich ohne Ende replizieren...*

RAY: *Tja, da müssen wir wohl höllisch aufpassen, was?*

MOLLY 2004: *Das kann man wohl sagen!*

RAY: *Wir haben dasselbe Problem mit biologischen Immunsystemen. Unser Immunsystem ist ziemlich mächtig, und wenn es sich infolge einer Autoimmunerkrankung gegen uns wendet, so ist das eine äußerst vertrackte Angelegenheit. Aber es gibt keine Alternative zu einem Immunsystem.*

MOLLY 2004: *Also könnte ein Softwarevirus das Immunsystem heimlich in ein Instrument der Vernichtung verwandeln?*

RAY: *Das ist möglich. Softwaresicherheit wird auf vielen Ebenen der Mensch-Maschinen-Zivilisation entscheidend sein. Wenn alles zu Information wird, hängt unser Überleben von der Integrität der Software unserer Schutzsysteme ab. Selbst auf der wirtschaftlichen Ebene ist der Erhalt von Informationen schaffenden Geschäftsmodellen entscheiden für unser Wohlergehen.*

MOLLY 2004: *Ich fühl mich irgendwie ein bisschen hilflos dabei. Ich meine, wenn alles zwischen guten und bösen Nanobots ausgefochten wird, bin ich ja nur noch Statist.*

RAY: *Das ist aber nicht gerade ein neues Phänomen. Wie viel Einfluss hast du denn heute darauf, was mit den Tausenden von Atomwaffen passiert, die auf der Welt verstreut sind?*

MOLLY 2004: *Ich habe zumindest eine Stimme in Wahlen, welche die internationalen Beziehungen beeinflussen.*

RAY: *Es gibt keinen Grund, weshalb sich das ändern sollte. Eines der großen politischen Themen der 2020er und 2030er wird die Schaffung*

eines zuverlässigen nanotechnischen Immunsystems sein.

MOLLY 2004: *Und was ist mit der starken KI?*

RAY: *Nun, die gute Nachricht ist, dass sie uns vor bösartiger Nanotechnik beschützen wird, weil sie schlau genug ist, um dafür zu sorgen, dass die Schutztechnik der destruktiven Technik immer einen Schritt voraus ist.*

NED LUDD: *Vorausgesetzt, sie ist auf unserer Seite.*

RAY: *In der Tat.*

KAPITEL 9

Antworten auf Kritik

Der menschliche Geist mag fremdartige Ideen ebenso wenig wie der Körper fremdartige Proteine, und sträubt sich dagegen mit vergleichbarem Aufwand.

W. I. BEVERIDGE

Wenn ein [...] Wissenschaftler sagt, etwas sei möglich, dann hat er ziemlich sicher recht, wenn er aber sagt, es sei unmöglich, dann liegt er höchstwahrscheinlich falsch.

ARTHUR C. CLARKE

Ein Überblick

Mit *The Age of Spiritual Machines* habe ich die Untersuchung gewisser exponentieller Entwicklungen begonnen, die ich in diesem Buch genauer unter die Lupe zu nehmen suchte. *The Age of Spiritual Machines* hat viele unterschiedliche Reaktionen ausgelöst, unter anderem breite Diskussionen über die bevorstehenden fundamentalen Umwälzungen, die das Buch in Aussicht stellte (beispielsweise die im letzten Kapitel skizzierte Pro-Contra-Debatte, die Bill Joys *Wired*-Artikel „Why the Future Doesn’t Need Us“ nach sich zog). Zu den Reaktionen gehörten auch zahlreiche Versuche, auf verschiedenen Ebenen darzulegen, weshalb diese Veränderungen nicht eintreten werden, können oder sollten. Es folgt zunächst eine Zusammenfassung der Kritik, auf die ich in diesem Kapitel eingehen werde.

- „Kritik nach Malthus“: *Es ist ein Fehler, exponentielle Trends ins Unendliche zu extrapolieren, da irgendwann die Ressourcen des Wachstums unweigerlich aufgebraucht sein werden. Außerdem werden wir nicht genug Energie haben, um die prognostizierten außerordentlich dichten Rechenplattformen zu betreiben – und*

selbst wenn, so wären diese so heiß wie die Sonne. Exponentielle Trends erreichen eine Asymptote, doch die Materie- und Energieressourcen für Berechnung und Kommunikation sind pro Rechenoperation und pro Bit gerechnet so gering, dass diese Trends so lange anhalten können, bis nichtbiologische Intelligenz Aberbillionen Mal leistungstärker ist als biologische Intelligenz. Reversible Berechnung kann den Energiebedarf und die Wärmeentwicklung um viele Größenordnungen verringern. Selbst wenn wir uns auf „kalte“ Computer beschränken, können wir nichtbiologische Berechnungsplattformen bauen, die biologische Intelligenz weit übertreffen.

- „Kritik zur Software“: *Wir machen exponentielle Fortschritte mit Hardware, doch die Software ist im Schlamm stecken geblieben.* Die Verdopplungszeit des Software-Fortschritts ist zwar länger als die der Hardware, doch auch Software gewinnt exponentiell an Funktionalität, Effizienz und Komplexität. Viele Software-Anwendungen, von Suchmaschinen bis zu Spielen, greifen routinemäßig auf KI-Methoden zurück, die erst vor zehn Jahren erforscht wurden. Es gibt deutlichen Zuwachs bei der Gesamtkomplexität von Software, bei der Softwareproduktivität und der Effizienz beim Lösen wichtiger algorithmischer Probleme. Des Weiteren haben wir eine effektive Strategie, um die Fähigkeiten menschlicher Intelligenz auf Maschinen zu übertragen: das Reverse Engineering des Gehirns, um dessen Funktionsprinzipien zu ergründen und in ausreichend leistungsfähigen Rechenplattformen nachzubilden. Jeder Aspekt dieses Reverse Engineering beschleunigt sich: die räumliche und zeitliche Auflösung von Gehirnscans, das Wissen über die verschiedenen Funktionsebenen des Gehirns und die Bemühungen um realistische Modelle für die Simulation von Neuronen und Gehirnregionen.
- „Kritik zur Analogverarbeitung“: *Digitale Berechnung ist zu unflexibel, denn digitale Bits sind entweder an oder aus. Biologische Intelligenz ist größtenteils analog und daher zu feinen Abstufungen fähig.* Es stimmt, dass das menschliche Gehirn auf digital gesteuerten analogen Methoden beruht, doch diese Methoden können wir auch in unseren Maschinen zur Anwendung bringen. Des Weiteren können analoge Vorgänge durch digitale Berechnung

mit beliebiger Genauigkeit simuliert werden, während das Gegenteil nicht der Fall ist.

- „Kritik zur Komplexität neuronaler Verarbeitung“: *Die Informationsprozesse in zwischenneuronalen Verknüpfungen (Axone, Dendriten, Synapsen) sind weitaus komplexer als die vereinfachten Modelle für künstliche neuronale Netze.* Das stimmt, doch Simulationen von Gehirnregionen basieren nicht auf diesen vereinfachten Modellen. Wir haben realistische mathematische Modelle und Computersimulationen von Nervenzellen und Neuronenbindungen entwickelt, welche die Nichtlinearitäten und Feinheiten ihrer biologischen Vorbilder nachbilden. Des Weiteren haben wir festgestellt, dass die funktionale Komplexität von Gehirnregionen oft geringer ist als die der Neuronen, aus denen sie bestehen. Wir verfügen bereits über funktionierende Modelle und Simulationen für mehrere Dutzend Gehirnregionen. Die im Genom enthaltenen Informationen über den Gehirnaufbau belaufen sich redundanzbereinigt auf etwa dreißig bis hundert Millionen Bytes und sind somit durchaus handhabbar.
- „Kritik zu Mikrotubuli und Quantenberechnung“: *Die Mikrotubuli in Neuronen sind zu Quantenberechnungen in der Lage und diese Quantenberechnungen sind eine Voraussetzung für Bewusstsein. Um eine Persönlichkeit „hochzuladen“ müsste ihr exakter Quantenzustand erfasst werden.* Es gibt weder Hinweise für noch gegen diese Aussage. Doch selbst wenn sie stimmt, spricht nichts gegen Quantenberechnungen in nichtbiologischen Systemen. In der Halbleitertechnik werden bereits Quanteneffekte ausgenutzt (Beispiel Tunneleffekt in Transistoren) und maschinenbasierte Quantenberechnung ist in Entwicklung. Was die exakte Erfassung eines Quantenzustands betrifft: Bevor ich diesen Satz geschrieben habe, befand ich mich noch in einem völlig anderen Quantenzustand – bin ich deshalb schon eine andere Person? Vielleicht ja, doch hätte man meinen Zustand vor einer Minute erfasst, würde ein auf diesen Informationen basierender Upload immer noch erfolgreich einen „Ray-Kurzweil-Turing-Test“ bestehen.
- „Die Church-Turing-These“: *Wir können zeigen, dass eine breite Klasse von Problemen nicht durch Turingmaschinen lösbar ist. Es lässt sich außerdem zeigen, dass Turingmaschinen jeden*

erdenklichen Computer emulieren können (das heißt, es gibt eine Turingmaschine, die alle Probleme lösen kann, die irgendein Computer lösen kann), dies zeigt, dass es eine klare Einschränkung der Probleme gibt, die ein Computer lösen kann. Menschen sind jedoch in der Lage, diese Probleme zu lösen, darum werden Maschinen niemals menschliche Intelligenz emulieren können. Menschen sind genauso wenig wie Maschinen in der Lage, solche „unlösbaren“ Probleme zu lösen. Menschen können in manchen Fällen fundierte Vermutungen anstellen, doch das können Maschinen auch, und meistens schneller.

- „Kritik zu Fehlerquoten“: *Computersysteme von wachsender Komplexität weisen eine bedenklich hohe Rate katastrophaler Fehler auf. Thomas Ray schreibt, wir „erweitern die Grenzen dessen, was wir mit konventionellen Ansätzen effektiv entwerfen und bauen können.“* Wir haben zunehmend komplexe Systeme für eine breite Palette missionskritischer Aufgaben entwickelt, und die Fehlerquoten dieser Systeme sind extrem niedrig. Imperfektion ist jedoch eine inhärente Eigenschaft komplexer Prozesse, und dazu gehört natürlich auch die menschliche Intelligenz.
- „Lock-in-Effekt“: *Die großen und komplexen Versorgungssysteme (und die riesigen Kosten dieser Systeme) beispielsweise in den Bereichen Energie und Transport blockieren den Fortschritt und verhindern somit die prognostizierten schnellen Umwälzungen der Singularität. Insbesondere Informationsprozesse wachsen exponentiell in Leistungsfähigkeit und Preis-Leistung. Wir haben bereits schnelle Paradigmenwechsel in allen Aspekten der Informationstechnik miterlebt, wobei es nie zu irgendwelchen Lock-in-Effekten kam (trotz massiver Kosten in Bereichen wie Internet und Telekommunikation). Selbst in den Sektoren Energie und Transport wird Nanotechnik für revolutionäre Innovationen sorgen.*
- „Ontologie-Kritik“: *John Searle beschreibt mehrere Versionen seiner Analogie des Chinesischen Zimmers. In einer dieser Versionen befolgt ein Mensch ein schriftliches Programm, um Fragen auf Chinesisch zu beantworten. Seine Antworten erwecken den Anschein, er wäre der Sprache mächtig, dabei befolgt er nur mechanisch die schriftlichen Anweisungen. Er versteht kein Chinesisch und ist sich seines Tuns daher nicht wirklich bewusst.*

Laut Searle versteht der „Mensch“ letztlich überhaupt nichts, denn er ist „nur ein Computer“. Es sei offensichtlich, dass Computer nicht verstehen können, was sie tun, da sie lediglich Regeln befolgen. Searles Argument ist tautologisch, denn es setzt die Schlussfolgerung, Computer seien unfähig zu echtem Verständnis, voraus. Der Trick bei dieser Analogie hat unter anderem mit Größenverhältnissen zu tun. Searle beschreibt ein sehr einfaches System und stellt dann die Frage, ob ein solches System zu echtem Verständnis fähig sein könne. Doch die Systembeschreibung an sich ist irreführend. Um mit den Annahmen konsistent zu sein, müsste das Chinesische Zimmer so komplex wie ein menschliches Gehirn sein, und würde daher auch genauso viel verstehen wie ein menschliches Gehirn. Der Mensch in diesem Gedankenexperiment dient dabei als Zentralprozessor und würde nur einen kleinen Teil des Systems ausmachen. Der Mensch allein hätte kein Verständnis des Chinesischen – das Verständnis wäre über das komplette Programmmuster sowie in den Notizen, die der Mensch machen müsste, um das Programm zu befolgen, verteilt. Keine meiner Nervenzellen spricht Englisch, ich dagegen schon. Mein Sprachverständnis liegt in Form eines weitläufigen Musters von Neurotransmitterkonzentrationen, synaptischen Spalten und Neuronenbindungen vor.

- *„Die Schere zwischen Arm und Reich“: Es ist wahrscheinlich, dass diese Techniken gewisse Möglichkeiten für reiche Menschen schaffen, die dem Rest der Menschheit verwehrt bleiben.* Das ist natürlich nichts Neues, doch ich würde dagegenhalten, dass die Preise dieser Techniken aufgrund des anhaltenden exponentiellen Preis-Leistungs-Wachstums so schnell fallen, dass sie bald praktisch gratis verfügbar sind.
- *„Zu erwartende staatliche Regulationen“: Staatliche Regulationen werden den technischen Fortschritt einschränken und zum Erliegen bringen.* Die hemmende Wirkung von Regulationen ist durchaus Grund zur Besorgnis, bisher hatte sie jedoch wenig erkennbaren Einfluss auf die in diesem Buch besprochenen Entwicklungen. Die wirtschaftlichen und sonstigen Kräfte, die den technischen Fortschritt vorantreiben, werden immer stärker werden, solange sie nicht durch eine totalitäre Weltregierung unterdrückt werden. Selbst

umstrittene Bereiche wie die Stammzellenforschung sind nicht mehr als einzelne Felsen, an denen der Fluss des Fortschritts ungehindert vorbeiströmt.

- „Theistische Kritik“: William A. Dembski: *„Zeitgenössischen Materialisten wie Ray Kurzweil [...] zufolge ist der menschliche Geist durch die Bewegungen und Verwandlungen von Materie ausreichend erklärbar. Doch Materialismus ist vorhersehbar, die Realität dagegen nicht. Vorhersehbarkeit [ist] der große Vorzug des Materialismus [...] und Sinnesleere [ist] sein großer Nachteil.“* Komplexe Systeme aus Materie und Energie sind nicht vorhersehbar, weil sie auf einer großen Anzahl nicht vorhersehbarer quantenmechanischer Ereignisse beruhen. Selbst wenn wir eine Interpretation der Quantenmechanik mit „versteckten Variablen“ annehmen (welche besagt, dass quantenmechanische Ereignisse nur scheinbar unvorhersehbar sind, aber in Wirklichkeit auf nicht messbaren versteckten Variablen beruhen), so wäre das Verhalten komplexer Systeme immer noch praktisch unvorhersehbar. Alles deutet darauf hin, dass wir uns in Richtung nichtbiologischer Systeme bewegen, die ebenso komplex sind wie biologische Systeme. Diese künftigen Systeme werden kein bisschen „sinnesleerer“ sein als Menschen, und in vielen Fällen werden sie auf dem Reverse Engineering der menschlichen Intelligenz beruhen. Die Macht der Muster in Materie und Energie reicht aus, um die Fähigkeiten menschlicher Intelligenz zu erklären.
- „Kritik zu Holismus“: Organismen sind, um Michael Denton zu zitieren, *„selbstorganisierend, [...] selbstreferenziell, [...] selbstreplizierend, [...] reziprok, [...] selbstgestaltend und [...] holistisch.“* Solcherlei organische Formen können nur durch biologische Prozesse entstehen und solche Formen sind *„unveränderliche, [...] undurchdringbare und [...] fundamentale Formen der Existenz.“*¹ Es stimmt, dass der biologische Aufbau eine Reihe fundamentaler Prinzipien verkörpert. Doch Maschinen können dieselben Prinzipien nutzen – und tun es bereits –, und nichts hält nichtbiologische Systeme davon ab, die emergenten Eigenschaften biologischer Muster zu erlangen.

Ich bin bereits in unzähligen Debatten und Dialogen in verschiedensten Foren auf diese Positionen eingegangen. Eine umfassende Antwort auf die wichtigsten mir bekannten Kritikpunkte zu geben ist eines der Ziele dieses Buches. Die meisten meiner Er widerungen auf die Kritik an der Machbarkeit und Zwangsläufigkeit wurden bereits im Verlauf des Buches besprochen, doch in diesem Kapitel möchte ich noch einmal ausführlich auf die interessanteren Kritikpunkte eingehen.

Zweifel an der Glaubwürdigkeit

Die offensichtlichste Kritik an dem von mir hier gezeichneten Bild der Zukunft besteht in dem Zweifel daran, dass solch grundlegende Umwälzungen überhaupt möglich sind. Der Chemiker Richard Smalley beispielsweise weist die Idee, dass Nanobots Aufgaben im menschlichen Blutkreislauf erfüllen könnten, als „albern“ zurück. Doch Wissenschaftler sind durch ihre Berufsethik zu großer Zurückhaltung angehalten, wenn es darum geht, die Aussichten aktueller Forschung zu beurteilen – diese Zurückhaltung geht leider oft soweit, dass führende Wissenschaftler davor zurückschrecken, das weitaus größere Potenzial zukünftiger Wissenschafts- und Technikgenerationen zu erwägen. Aufgrund der steigenden Rate von Paradigmenwechseln leistet dieser tief verwurzelte Pessimismus der Gesellschaft keinen guten Dienst, wenn es darum geht, die technischen Möglichkeiten der kommenden Jahrzehnte einzuschätzen. Man denke nur daran, wie unglaublich die heutige Technik den Menschen erscheinen würde, die vor hundert Jahren lebten.

Ein verwandter Einwand lautet, dass die Zukunft schwer vorhersehbar sei, was sich durch eine beliebig große Anzahl falscher Vorhersagen in der Vergangenheit belegen ließe. Tatsächlich ist es schwierig, wenn nicht unmöglich, vorherzusehen, welches Unternehmen oder welches Produkt Erfolg haben wird. Ebenso schwierig ist die Vorhersage, welcher technische Standard oder welche Architektur sich durchsetzen wird. (Wie wird es beispielsweise mit den unterschiedlichen Protokollen für Drahtloskommunikation WiMAX, CDMA und 3G in den nächsten Jahren

weitergehen?) Wie dieses Buch jedoch ausführlich darlegt, finden sich bemerkenswert präzise und vorhersehbare exponentielle Wachstumsverläufe bei der Effektivität von Informationstechniken (gemessen an Preis-Leistung, Bandbreite und anderen Leistungsgrößen). Das gleichmäßige Wachstum der Preis-Leistung von Berechnung dauert beispielsweise seit einem Jahrhundert an. Da die für Berechnung und Übertragung von Informationen nötige Mindestmenge an Energie und Materie verschwindend gering ist, werden die Entwicklungen in der Informationstechnik zumindest in diesem Jahrhundert weiter anhalten. Des Weiteren können wir den Stand dieser Technik zu zukünftigen Zeitpunkten zuverlässig vorhersagen.

Die Bewegung eines einzelnen Moleküls eines Gases ist praktisch unmöglich vorherzusagen, während das Verhalten des Gases insgesamt (bestehend aus einer großen Anzahl chaotisch interagierender Moleküle) anhand der Gesetze der Thermodynamik zuverlässig berechnet werden kann. Analog dazu ist es unmöglich, die Ergebnisse eines einzelnen Projektes oder Unternehmens vorherzusehen, während das zukünftige Potenzial der Informationstechnik insgesamt (bestehend aus einer Vielzahl chaotischer Aktivitäten) durch das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs zuverlässig vorhergesagt werden kann.

Viele aufgebrauchte Versuche, zu erklären, weshalb Maschinen – nichtbiologische Systeme – niemals mit Menschen vergleichbar sein werden, scheinen durch diese instinktive Ungläubigkeit motiviert zu sein. Die Geschichte des menschlichen Denkens ist geprägt von zahlreichen Versuchen, Ideen zurückzuweisen, welche die allgemeine Ansicht, unsere Spezies sei etwas Besonderes, infrage stellen. Kopernikus' Erkenntnis, dass die Erde nicht der Mittelpunkt des Universums ist, traf auf heftigen Widerstand – ebenso Darwins Erkenntnis, dass wir eine (geringfügige) Weiterentwicklung der Affen sind. Die Vorstellung, dass Maschinen menschliche Intelligenz erlangen und uns überflügeln könnten, scheint den Status der Menschen erneut infrage zu stellen.

Kritik nach Malthus

Exponentialtrends halten nicht ewig an. „Kaninchen in Australien“ ist das klassische Beispiel für einen Exponentialtrend, der gegen eine Wand läuft. Wenn eine Spezies ein neues Habitat erobert, so vermehrt sie sich solange exponentiell, bis die Kapazität der Umgebung erschöpft ist. Beim Erreichen dieser Grenzen kann die Populationsgröße sogar wieder sinken – beispielsweise wenn Menschen eine Pestepidemie bemerken und versuchen, sie auszurotten. Ein anderes Beispiel sind Mikroorganismen, die sich im Körper eines Tieres exponentiell vermehren, bis die Grenze erreicht ist: der Verbrauch der nötigen Ressourcen, eine Immunantwort oder der Tod des Wirtes.

Auch die Erdbevölkerung bewegt sich auf eine Grenze zu. Familien in entwickelten Ländern steuern die Anzahl der Geburten und haben recht hohe Ansprüche, was die Ressourcen betrifft, die sie ihren Kindern zur Verfügung stellen wollen. Infolge dessen ist die Bevölkerungsexplosion in der entwickelten Welt weitgehend abgeflaut. Dagegen streben die meisten (aber nicht alle) Menschen in unterentwickelten Nationen immer noch große Familien als soziale Absicherung an, in der Hoffnung, dass mindestens ein Kind lange genug überlebt, um sie im Alter zu versorgen. Dennoch verlangsamt sich das Bevölkerungswachstum, während das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs auf breiter Front für Wirtschaftswachstum sorgt.

Gibt es also nicht auch eine solche Wachstumsgrenze für die exponentiellen Entwicklungen in der Informationstechnik?

Die Antwort lautet: ja, aber nicht, bevor die in diesem Buch beschriebenen fundamentalen Veränderungen eingetreten sind. Wie in **Kapitel 3** beschrieben ist der Bedarf an Energie und Materie für die Berechnung und Übertragung von einem Bit verschwindend gering. Mit reversiblen Logikgattern wird Energie nur noch für die Übertragung von Ergebnissen und für Fehlerkorrektur verbraucht. Ansonsten wird die entstehende Wärme unmittelbar recycelt und für die nächste Rechenoperation verwendet.

Wie in **Kapitel 5** besprochen wird die Nanotechnik unseren Energieverbrauch in praktisch allen Bereichen – Berechnung, Kommunikation, Fertigung und Transport – drastisch reduzieren. Sie wird

uns auch ermöglichen, erneuerbare Energiequellen wie das Sonnenlicht zu erschließen. Wir könnten unseren voraussichtlichen Energiebedarf im Jahr 2030 (dreißig Billionen Watt) vollständig durch Solarenergie abdecken, wenn wir nur 0,03 Prozent (drei Zehntausendstel) der Sonneneinstrahlung auf der Erde in Strom umwandeln. Dies wird ermöglicht durch extrem kostengünstige, leichte und effiziente nanogefertigte Solarkollektoren in Kombination mit Nanobrennstoffzellen, welche die erzeugte Energie speichern und verteilen.

Ein praktisch grenzenloses Limit. Wie in **Kapitel 3** besprochen hat ein optimal ausgelegter 1-kg-Computer mit reversibler Logik etwa 10^{25} Atome und kann etwa 10^{27} Bits speichern. Allein die elektromagnetischen Interaktionen zwischen seinen Teilchen bewirken 10^{15} Zustandsänderungen pro Bit pro Sekunde, welche für Berechnungen genutzt werden können, womit wir auf 10^{42} Berechnungen pro Sekunde für den ultimativen „kalten“ 1-kg-Rechner kommen. Das ist etwa 10^{16} Mal mehr Rechenleistung als alle heutigen biologischen Gehirne zusammengenommen. Wenn wir zulassen, dass unser ultimativer Computer heiß wird, können wir diesen Wert noch mal um das 10^8 -fache erhöhen. Und natürlich werden wir unsere Rechenressourcen nicht auf ein Kilogramm Materie beschränken, sondern letzten Endes einen beträchtlichen Teil der Materie und Energie zunächst der Erde und dann des Sonnensystems darauf verwenden – und uns dann noch weiter ausbreiten.

Jedes Paradigma erreicht ein Limit. Wir rechnen damit, dass das Moore'sche Gesetz (welches das Schrumpfen der Transistorgröße auf flachen Computerchips beschreibt) in den nächsten zwei Jahrzehnten an seine Grenzen stößt. Der Termin für das Außerkrafttreten des Moore'schen Gesetzes wird immer wieder verschoben. Die ersten Schätzungen lagen bei 2002, doch Intel lässt mittlerweile verlauten, es werde nicht vor 2022 passieren. Doch wie ich in **Kapitel 2** erläuterte, wurden immer dann, wenn ein Paradigma der Rechnertechnik sich seinem Limit annäherte, die Forschungsbemühungen intensiviert, um das nächste Paradigma auf den Weg zu bringen. Dies ist in der ein Jahrhundert langen Geschichte der exponentiell wachsenden Berechnungstechnik bereits viermal geschehen

(von elektromagnetischen Rechnern über Relais, Elektrodenröhren und diskreten Transistoren zu den Mikrochips). Wir haben bereits wichtige Meilensteine passiert, auf dem Weg zum nächsten (sechsten) Paradigma der Rechnertechnik: dreidimensionale selbstorganisierende Schaltkreise auf Molekülebene. Das bevorstehende Ende des derzeitigen Paradigmas ist somit kein wahres Limit.

Der Informationstechnik sind Grenzen gesetzt, doch diese Grenzen liegen in weiter Ferne. Ich schätze die Rechenkapazität der Materie und Energie unseres Sonnensystems auf mindestens 10^{70} cps (siehe **Kapitel 6**). Mit mindestens 10^{20} Sternen im All ergibt das etwa 10^{90} cps für das komplette Universum – was mit Seth Lloyds unabhängiger Analyse übereinstimmt. Ja, es gibt Grenzen – doch sie sind keine große Einschränkung.

Software-Kritik

Ein häufiger Einwand gegen starke KI und somit gegen die Singularität beruht auf der Unterscheidung von qualitativen und quantitativen Entwicklungen. Das Argument lautet kurz gesagt, dass zwar die rohe Kapazität, was Speicher, Leistung und Bandbreite betrifft, exponentiell steigt, dies jedoch nicht auf die Software (das heißt, Methoden und Algorithmen) zutrifft. Dies ist die Hardware-versus-Software-Frage und sie ist von großer Bedeutung. Jaron Lanier zufolge ist die Ansicht sogenannter kybernetischer Totalisten (zu denen er mich zählt), dass wir die Software schon auf irgendeine nicht näher spezifizierte Weise zustande bringen werden – Lanier bezeichnet diese Position als Software „deus ex machina“.² Dabei werden jedoch die von mir beschriebenen spezifischen und detaillierten Szenarios zur Erzeugung intelligenter Software außer Acht gelassen. Das Reverse Engineering, ein Unterfangen, das schon viel weiter gediehen ist als Lanier und vielen anderen klar ist, wird unser KI-Toolkit um die selbstorganisierenden Methoden menschlicher Intelligenz erweitern. Auf dieses Thema werde ich gleich zurückkommen, doch zunächst möchte ich einige andere Missverständnisse bezüglich des angeblichen Mangels an Fortschritt von Software klarstellen.

Stabilität von Software. Lanier bezeichnet Software als inhärent „schwerfällig“ und „instabil“ und erstellt eine lange Liste von mit Software erlebten Enttäuschungen. Er schreibt: „Computer dazu zu bewegen, Aufgaben von nennenswerter Komplexität zuverlässig und flexibel und ohne Abstürze oder Sicherheitslücken zu erledigen, ist praktisch unmöglich.“³ Ich will hier nicht alle existierende Software in Schutz nehmen, aber es ist falsch, dass komplexe Software notwendigerweise instabil und anfällig für katastrophale Abstürze ist. Es gibt viele Beispiele für missionskritische Software, die nur sehr selten oder gar nicht ausfällt – beispielsweise die raffinierten Software-Programme, die einen steigenden Prozentsatz von Flugzeuglandungen steuern, Patienten auf Intensivstationen überwachen, intelligente Waffen lenken, Investitionen in Milliardenhöhe für mustererkennungsbasierte Hedgefonds tätigen und viele andere Funktionen erfüllen.⁴ Mir ist kein Fall bekannt, in dem ein Flugzeugabsturz durch Versagen der Landungs-Software verursacht wurde – für menschliche Piloten lässt sich das hingegen nicht behaupten.

Reaktionszeit von Software. Lanier beklagt: „Benutzeroberflächen von Computern reagieren tendenziell langsamer auf Benutzereingaben, beispielsweise einen Tastendruck, als noch vor fünfzehn Jahren... Was läuft da schief?“⁵ Ich würde Lanier empfehlen, sich heute noch mal an einen alten Computer zu setzen. Ich glaube, er hat vergessen, wie langsam, unumgänglich und beschränkt diese Geräte waren – mal abgesehen von den Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme. Man muss nur mal versuchen, seine heutige Arbeit mit zwanzig Jahre alter PC-Software zu erledigen. Es ist schlichtweg nicht wahr, dass alte Software in qualitativer oder quantitativer Hinsicht besser war.

Zwar finden sich auch Beispiele schlecht konzipierter Software, doch in der Regel sind langsame Reaktionszeiten auf neue Funktionen zurückzuführen. Wenn die Benutzer sich mit gleichbleibender Funktionalität zufriedengeben würden, so würde die exponentiell wachsende Rechen- und Speicherkapazität bald sämtliche Reaktionsverzögerungen eliminieren. Doch der Markt verlangt nach immer mehr Funktionen. Vor zwanzig Jahren gab es noch keine Suchmaschinen

oder sonstige Webintegrationen (es gab noch nicht mal ein Web), lediglich primitive Programmiersprachen, Formate und Programme und so weiter. Die Softwarefunktionalität hält stets Schritt mit den Grenzen der Machbarkeit.

Diese Romantisierung der Software vergangener Jahrzehnte ist vergleichbar mit der Verklärung vergangener Jahrhunderte, in denen die Menschen angeblich ein unbekümmertes Leben führten, ohne sich mit Maschinen herumärgern zu müssen. Das Leben war damals vielleicht freier, aber dafür auch kurz, mühsam, armselig und von Krankheiten und Schicksalsschlägen gezeichnet.

Preis-Leistung von Software. Beim Preis-Leistungs-Vergleich von Software sind drastische Entwicklungen zu beobachten. Wenn wir die Tabelle über Spracherkennungssoftware auf [Seite 100](#) betrachten, so sehen wir, dass man 1985 für fünftausend Dollar ein Softwarepaket erstehen konnte, das über ein Vokabular von eintausend Wörtern verfügte, keine fließende Sprache erkennen konnte, drei Stunden Training auf die Stimme des Benutzers benötigte und relativ ungenau arbeitete. Im Jahr 2000 dagegen bekam man für nur fünfzig Dollar ein Softwarepaket, das hunderttausend Wörter beherrscht, einen kontinuierlichen Sprachfluss verarbeiten kann, nur fünf Minuten Training benötigt, viel präziser ist und unter anderem Spracherkennung für die mündliche Eingabe von Befehlen anbietet.⁶

Produktivität der Softwareentwicklung. Wie sieht es mit der Produktion von Software aus? Ich selbst entwickle seit vierzig Jahren Software und habe somit einen gewissen Einblick in dieses Feld. Ich schätze die Verdopplungszeit der Produktivität der Softwareentwicklung auf etwa sechs Jahre, was langsamer ist als die Verdopplungszeit der Prozessor-Preis-Leistung (heute etwa ein Jahr). Dennoch wächst die Produktivität exponentiell. Die Entwicklungswerkzeuge, die Klassenbibliotheken und Hilfsmittel sind heute bedeutend effizienter als vor Jahrzehnten. In meinen aktuellen Projekten erreichen Dreier- oder Viererteams in einem Monat

Ziele, die vor fünfundzwanzig Jahren ein Dutzend oder mehr Leute ein ganzes Jahr beschäftigt hätten.

Softwarekomplexität. Vor zwanzig Jahren bestand ein Computerprogramm in der Regel in Tausenden oder Zehntausenden von Zeilen. Heute übliche Programme (beispielsweise für Logistik, Fabrikation, Reservierungssysteme oder biochemische Simulationen) umfassen Millionen von Zeilen oder noch mehr. Software für größere militärische Systeme, wie den Joint Strike Fighter, umfasst mehrere zehn Millionen Zeilen.

Software zur Steuerung von Software gewinnt ebenfalls rasch an Komplexität. IBM ist Vorreiter für „Autonomic Computing“, das heißt, Automatisierung von Softwaremanagement.⁷ Diese Systeme werden mit Modellen ihres eigenen Verhaltens programmiert und werden laut IBM „selbstkonfigurierend, selbstheilend, selbstoptimierend und selbstschützend“ sein. Die Software für Autonomic Computing wird mehrere zehn Millionen Codezeilen umfassen (die jeweils aus mehreren Bytes bestehen). Was Informationskomplexität angeht übertrifft Computersoftware bereits die wenigen zehn Millionen Bytes an sinnvollen Informationen, die das menschliche Genom und sein molekularer Apparat enthalten.

Die Menge an Informationen in einem Programm ist jedoch nicht das beste Maß für Komplexität. Ein Softwareprogramm kann sehr lang, aber voller nutzloser Informationen sein. Natürlich gilt dasselbe für das Genom, welches sehr ineffizient kodiert zu sein scheint. Es gab einige Versuche, Komplexitätsmaße für Software zu entwickeln – beispielsweise die von den Informatikern Arthur Watson und Thomas McCabe (National Institute of Standards and Technology) entwickelte „Zyklomatische Komplexität“.⁸ Diese Metrik bemisst die Komplexität der Programmlogik und der Verzweigungsstruktur. Es gibt deutliche Hinweise, dass die auf diese Weise gemessene Komplexität von Software rapide ansteigt, jedoch liegen nicht genügend Daten vor, um Verdopplungszeiten zu ermitteln.

Der Knackpunkt ist, dass die meisten komplexen Softwaresysteme im Industrieinsatz eine höhere Komplexitätsebene aufweisen als Programme

zur neuromorphen Simulation von Gehirnregionen oder zur biochemischen Simulation einzelner Nervenzellen. Wir können also bereits mit Ebenen der Softwarekomplexität umgehen, welche über das hinausgehen, was für die Modellierung und Simulation der parallelen, selbstorganisierenden, fraktalen Algorithmen des menschlichen Gehirns nötig ist.

Schnellere Algorithmen. Die Geschwindigkeit und Effizienz von Software-Algorithmen (bei gleichbleibender Hardware) ist drastisch gestiegen. Die Preis-Leistung beim Lösen essenzieller mathematischer Gleichungen und bei der Ausführung von Grundfunktionen, auf denen Programme für Signalverarbeitung, Mustererkennung und künstliche Intelligenz aufbauen, hat sich durch die Beschleunigung von Hardware und Software deutlich verbessert. Das Ausmaß dieser Verbesserungen variiert zwar je nach Problemstellung, doch alle Programme sind davon betroffen.

Ein gutes Beispiel ist Signalverarbeitung – eine rechenintensive Aufgabe, sowohl für Computer als auch für das menschliche Gehirn. Mark A. Richards (Georgia Institute of Technology) und Gary A. Shaw (MIT) haben eine klare Entwicklung zu effizienteren Signalverarbeitungsalgorithmen dokumentiert.⁹ Um Muster in Signalen zu finden ist es beispielsweise oft nötig, partielle Differenzialgleichungen zu lösen. Der Algorithmen-Experte Jon Bentley hat gezeigt, dass die zur Lösung dieser Art von Problem nötige Anzahl an Rechenoperationen kontinuierlich abgenommen hat.¹⁰ Zwischen 1945 und 1985 beispielsweise nahm die Anzahl an Rechenoperation für eine entsprechende Anwendung (das Finden einer elliptischen partiellen Differenziallösung für ein dreidimensionales Raster mit vier- undsechzig Elementen auf jeder Seite) um einen Faktor von dreihunderttausend ab. Dies ist eine Effizienzsteigerung von 38 Prozent pro Jahr (ohne Hardwareverbesserungen zu berücksichtigen).

Ein weiteres Beispiel ist die Übertragung von Rohsignalen über das Telefonnetz: Die Durchsatzrate stieg in zwölf Jahren von 300 Bits pro Sekunde auf 56.000 bps – eine jährliche Steigerung um 55 Prozent.¹¹ Dies ist teilweise auf schnellere Hardware, größtenteils jedoch auf algorithmische Verbesserungen zurückzuführen.

Ein bedeutendes Berechnungsproblem besteht in der Zerlegung von Signalen in ihre Frequenzkomponenten durch Fourier-Transformation, welche Signale als Summen von Sinuswellen darstellt. Diese Methode kommt unter anderem bei automatischer Spracherkennung zum Einsatz. Menschliche Spracherkennung beginnt ebenfalls mit der Zerlegung von Tonsignalen in ihre Frequenzkomponenten in der Hörschnecke. Der „Radix-2-Algorithmus“ von Cooley und Tukey für eine „schnelle Fourier-Transformation“ reduzierte die Anzahl von Rechenoperationen für eine Fourier-Transformation mit 1.024 Punkten um etwa zweihundert.¹² Ein verbesserter „Radix-4-Algorithmus“ erhöhte die Einsparung auf achthundert Operationen. Durch neuere „Wavelet-Transformationen“ können Signale als Summen von Wellenformen ausgedrückt werden, welche komplexer sind als Sinuswellen. Diese Methoden bringen eine weitere drastische Effizienzsteigerung bei der Zerlegung von Signalen in ihre Komponenten.

Die genannten Beispiele sind keine Ausnahmen: Die meisten rechenintensiven „Kern-Algorithmen“ haben signifikante Verbesserungen erfahren. Weitere Beispiele sind Sortierung, Suche, Autokorrelation (und andere statistische Verfahren) sowie Informationskompression und -dekompression. Fortschritte gibt es auch bei der Parallelisierung von Algorithmen, das heißt der Zerlegung einzelner Funktionen in viele Funktionen, welche simultan berechnet werden können. Wie zuvor besprochen führt Parallelisierung inhärent zu einer niedrigeren Betriebstemperatur. Das Gehirn setzt auf Parallelverarbeitung, um komplexere Funktionen und kürzere Reaktionszeiten zu ermöglichen, und wir werden diesen Ansatz in unseren Maschinen anwenden müssen, wenn wir eine optimale Berechnungsdichte erreichen wollen.

Es gibt einen inhärenten Unterschied zwischen den Preis-Leistungs-Steigerungen der Hardware und den Effizienzsteigerungen der Software. Hardwareverbesserungen haben sich als bemerkenswert konstant und vorhersehbar erwiesen. Mit jeder neuen Ebene der Geschwindigkeit und Effizienz erhalten wir neue Mittel, um die nächste Ebene exponentieller Verbesserung zu erreichen. Softwareverbesserungen sind dagegen weniger absehbar. Richard und Shaw sprechen von „Wurmlöchern in der

Entwicklungszeit“, da uns eine einzige algorithmische Verbesserung genauso viel bringen kann wie Jahre der Hardwareentwicklung. Auf Fortschritte der Softwareeffizienz können wir uns jedoch nicht so sehr verlassen wie auf die fortwährende Beschleunigung der Hardware. Nichtsdestotrotz leisten algorithmische Entwicklungssprünge einen beträchtlichen Beitrag zur insgesamt für die Emulation menschlicher Intelligenz verfügbaren Rechenleistung – und wahrscheinlich wird es sie auch weiterhin geben.

Die ultimative Quelle intelligenter Algorithmen. Der wichtigste Punkt ist, dass es einen konkreten Plan gibt um menschliche Intelligenz in Maschinen zu erreichen: das Reverse Engineering der parallelen, chaotischen, selbstorganisierenden und fraktalen Methoden des menschlichen Gehirns und die Übertragung dieser Methoden auf moderne Computerhardware. Angesichts unseres exponentiell wachsenden Wissens über das menschliche Gehirn und seine Arbeitsweise (siehe **Kapitel 4**) darf erwartet werden, dass wir in zwanzig Jahren über detaillierte Modelle und Simulationen der mehreren Hundert informationsverarbeitenden Organe verfügen, die wir kollektiv als das menschliche Gehirn bezeichnen.

Ein Verständnis der Arbeitsweise menschlicher Intelligenz wird unseren Baukasten für KI-Algorithmen erweitern. Viele dieser Methoden kommen massiv in maschinellen Mustererkennungssystemen zum Einsatz und zeigen feinsinniges, komplexes Verhalten, das für den Entwickler nicht absehbar ist. Selbstorganisierende Methoden sind keine einfache Abkürzung auf dem Weg zu komplexem und intelligentem Verhalten, doch sie sind ein wichtiges Werkzeug um die Komplexität von Systemen zu erhöhen, ohne dass sie dabei instabil werden, wie es oft bei explizit programmierten logischen Systemen der Fall ist.

Wie zuvor besprochen entwickelt sich das menschliche Gehirn anhand eines Genoms mit gerade mal dreißig bis hundert Millionen Bytes an sinnvollen, komprimierten Informationen. Wie kann ein Organ mit hundert Billionen Verknüpfungen aus so einem kleinen Genom entstehen? (Ich schätze, dass allein die Daten zur Beschreibung der Verknüpfungsstruktur eines menschlichen Gehirns eine Million Mal umfangreicher sind als die

Informationen im Genom).¹³ Die Antwort lautet, dass das Genom eine Reihe von Prozessen beschreibt, die jeweils durch chaotische Methoden (das heißt, zufällige Initialisierung gefolgt von Selbstorganisation) die Informationsmenge vergrößern. Beispielsweise ist bekannt, dass die neuronale Verknüpfungsstruktur einem Plan folgt, in dem Zufall eine große Rolle spielt. Wenn ein Individuum mit einer Umgebung konfrontiert ist, so organisieren sich seine Verknüpfungen und Neurotransmittermuster selbstständig so um, dass sie der Welt besser entsprechen – doch der ursprüngliche Aufbau ist durch ein Programm festgelegt, das nicht allzu komplex ist.

Ich behaupte keinesfalls, dass wir menschliche Intelligenz Verknüpfung für Verknüpfung – in einer Art riesigem, regelbasierten Expertensystem – nachprogrammieren werden. Ebenso wenig steht zu erwarten, dass menschliche Intelligenz durch einen riesigen genetischen Algorithmus entstehen wird. Lanier bemerkt zu Recht, dass ein solcher Ansatz unvermeidlich auf einem lokalen Optimum stagnieren würde (eine Lösung, die zwar besser als alle ähnlichen Lösungen, aber nicht wirklich optimal ist). Lanier äußert auch, ebenso wie Richard Dawkins, die interessante Beobachtung, dass die Evolution „das Rad übersehen hat“ (weil es keine Organismen mit Rädern gibt). Das ist allerdings nicht völlig korrekt: Es gibt radartige Proteinstrukturen, beispielsweise den Ionenmotor von bakteriellen Flagellen, welche der dreidimensionalen Fortbewegung dienen.¹⁴ Größeren Organismen nutzen Räder ohne Straßen natürlich wenig, weshalb sich in der Natur nie Räder für Bewegung auf zweidimensionalen Oberflächen entwickelten.¹⁵ Stattdessen brachte die Evolution eine Spezies hervor, die sowohl Räder als auch Straßen baute, und schuf somit indirekt eine ganze Menge Räder. An indirekten Methoden ist nicht das Geringste auszusetzen, wir selbst setzen sie ständig in unserer Technik ein. Tatsächlich basiert Evolution allgemein auf Mittelbarkeit (das heißt, die Produkte einer Entwicklungsstufe schaffen die nächste Entwicklungsstufe).

Das Reverse Engineering des Gehirns ist nicht darauf angewiesen, jedes einzelne Neuron zu replizieren. In **Kapitel 5** haben wir gesehen, dass ganze Gehirnregionen mit Millionen oder Milliarden von Neuronen durch funktional äquivalente Parallel-Algorithmen modelliert werden können. Die

Machbarkeit solcher neuromorphen Verfahren wurde durch Modelle und Simulationen einiger Dutzend Gehirnregionen demonstriert. Wie besprochen sinken die Anforderungen an die Rechenleistung dabei oft beträchtlich (wie Lloyd Watts, Carver Mead und andere gezeigt haben).

Lanier schreibt: „Wenn es ein komplexes, chaotisches Phänomen gibt, so sind das wir“. Dem stimme ich zu, ich sehe darin jedoch kein Hindernis. Mein eigenes Interessengebiet sind chaotische Berechnungen, welche wir für Mustererkennung benutzen, die wiederum den Kern menschlicher Intelligenz bildet. Chaos ist Teil des Mustererkennungsprozesses – es treibt ihn an –, und es gibt keinen Grund, weshalb wir diese Methoden nicht auf unsere Maschinen übertragen können sollten.

Lanier schreibt, „die Evolution hat sich weiterentwickelt, etwa indem sie sexuelle Vermehrung einführte, doch ist es ihr nie gelungen, etwas an ihrem sehr langsamen Tempo zu ändern.“ Dies gilt jedoch nur für die natürliche Evolution, nicht für die technische, und genau deshalb haben wir uns über die biologische Evolution hinweggesetzt. Lanier ignoriert hier eine zentrale Eigenschaft evolutionärer Prozesse: Sie beschleunigen sich, weil mit jeder Stufe machtvollere Werkzeuge für die Entwicklung der nächsten Stufe entstehen. Während die ersten Schritte der biologischen Evolution (RNS) Milliarden von Jahren dauerten, schreitet die heutige technische Evolution in rasender Geschwindigkeit voran. Das World Wide Web entstand vor nur wenigen Jahren und entfaltete sich entschieden schneller als zum Beispiel die Kambrische Explosion. Diese Phänomene sind alle Teil desselben Evolutionsvorgangs, welcher langsam begann, nun relativ flott ist und in wenigen Jahrzehnten unfassbar schnell sein wird.

Lanier schreibt, „das ganze Unterfangen mit der künstlichen Intelligenz beruht auf einem intellektuellen Irrtum.“ Bis zu dem Zeitpunkt, an dem Computer wirklich menschliche Intelligenz in allen Dimensionen erreicht haben, werden Skeptiker immer behaupten können, das Glas sei halb leer. Jeder neuen Errungenschaft im KI-Bereich kann entgegenhalten werden, dass andere Ziele noch nicht erreicht wurden – das ist das Kreuz des KI-Entwicklers: Sobald ein bestimmtes Ziel erreicht ist, zählt es nicht mehr in den Bereich von KI, sondern gilt nur noch als nützliche aber herkömmliche

Technik. Daher gilt KI zuweilen als die Menge der Probleme, die wir noch nicht gelöst haben.

Doch Maschinen gewinnen tatsächlich an Intelligenz, und die Liste der Aufgaben, die sie übernehmen können – Aufgaben, die ehemals Zuwendung menschlicher Intelligenz erforderten –, wird immer länger. Wie wir in **Kapitel 5** und **6** gesehen haben, gibt es heute Hunderte von Beispielen für funktionierende schwache KI.

Eines der vielen Beispiele ist Schachsoftware (siehe den Abschnitt „Remis gegen Deep Fritz“ auf den **Seiten 276–280**), die nicht mehr allein auf roher Rechenleistung beruht. Aufgrund von Verbesserungen der Mustererkennungsalgorithmen konnte Deep Fritz im Jahre 2002 auf nur acht PCs dieselbe Spielstärke erreichen, wie IBMs Deep Blue von 1997. Es gibt viele solcher Beispiele für qualitative Verbesserungen von Softwareintelligenz. Bis jedoch das komplette Spektrum menschlicher Intelligenz emuliert werden kann, wird es stets möglich sein, das Potenzial von Maschinen kleinzureden.

Sobald wir vollständige Modelle menschlicher Intelligenz haben, werden Maschinen die flexible und feinfühligte Mustererkennung des Menschen mit den Vorteilen maschineller Intelligenz, was Geschwindigkeit, Speicher und vor allem schnellen Austausch von Wissen und Fähigkeiten betrifft, kombinieren.

Kritik zu Analog-Verarbeitung

Viele Kritiker, wie zum Beispiel Thomas Ray (Zoologe und Erforscher evolutionärer Algorithmen), bezichtigen Theoretiker wie mich der angeblichen „Verkennung der einzigartigen Natur des digitalen Mediums“.¹⁶

Nun, zunächst einmal beinhaltet meine These die Kombination analoger und digitaler Methoden, wie dies auch das menschliche Gehirn tut. Moderne neuronale Netze basieren beispielsweise auf hochdetaillierten Modellen menschlicher Nervenzellen mit nichtlinearen, analogen Aktivierungsfunktionen. Aus der Emulation der analogen Methoden des Gehirns ergeben sich beträchtliche Effizienzvorteile. Analoge Methoden

sind kein exklusiver Vorzug biologischer Systeme. Früher war von „Digitalcomputern“ die Rede, um diese von den während des Zweiten Weltkriegs gebräuchlichen Analogrechnern abzugrenzen. Die Arbeiten von Carver Mead zeigen, dass digital gesteuerte Analogschaltungen auf Siliziumbasis möglich sind, welche den neuronalen Schaltungen von Säugetieren nachempfunden sind. Analoge Methoden können mit konventionellen Transistoren – die im Grunde genommen analog arbeiten – reproduziert werden. Digital werden Transistoren erst durch einen zusätzlichen Mechanismus, der die Ausgangsspannung mit einem bestimmten Schwellenwert vergleicht.

Vor allem aber gibt es nichts, was mit analogen, aber nicht mit digitalen Methoden erreicht werden kann. Analoge Prozesse können jederzeit digital emuliert werden (durch Fließkommarepräsentation), während der Umkehrschluss nicht unbedingt gilt.

Kritik zu Komplexität neuronaler Verarbeitung

Ein weiterer häufiger Kritikpunkt lautet, dass der biologische Aufbau des Gehirns schlichtweg zu komplex sei, um mit nichtbiologischer Technik modelliert und simuliert zu werden. Thomas Ray schreibt zum Beispiel:

Die Struktur und die Funktion des Gehirns oder seiner Komponenten sind nicht trennbar. Der Blutkreislauf versorgt das Gehirn mit allem, was es zum Leben braucht, er transportiert jedoch zugleich auch Hormone, die einen integralen Bestandteil der chemischen informationsverarbeitenden Funktion des Gehirns darstellen. Die Membran eines Neurons ist ein Strukturmerkmal, das die Grenzen und die Integrität des Neurons definiert, doch sie bildet auch die Oberfläche, entlang welcher durch Depolarisation Signale übertragen werden. Die strukturellen und lebenserhaltenden Funktionen können nicht von der Informationsverarbeitung getrennt werden.¹⁷

Ray beschreibt darauf weitere Beispiele aus dem „breiten Spektrum chemischer Kommunikationsmechanismen“, über die das Gehirn verfügt.

Doch all diese Eigenschaften sind ohne Weiteres modellierbar, und es gibt bereits große Fortschritte auf diesem Gebiet. Die Modellierungssprache ist Mathematik, und die Übersetzung mathematischer Modelle in entsprechende nichtbiologische Mechanismen (beispielsweise

Computersimulationen oder Transistoren im Analogbetrieb) ist ein recht unkomplizierter Prozess. Die Übertragung von Hormonen über den Blutkreislauf beispielsweise ist ein Phänomen von extrem geringer Bandbreite, das sich problemlos modellieren und replizieren lässt. Die Konzentration bestimmter Hormone und anderer Chemikalien im Blut beeinflusst simultan die Parameter einer großen Anzahl von Synapsen.

Thomas Ray kommt zu dem Schluss, dass „metallische Rechensysteme auf grundlegend verschiedenen dynamischen Eigenschaften beruhen und die Funktion des Gehirns niemals präzise und exakt ‚kopieren‘ können.“ Wenn wir die Fortschritte in Neurobiologie, Scantechnik, Modellierung von Neuronen und Neuronenverbänden, neuroelektronischer Kommunikation, Neuroimplantation und ähnlichen Gebieten verfolgen, so sehen wir, dass sich die hervorragenden Funktionalitäten biologischer Informationsverarbeitung mit beliebiger Genauigkeit reproduzieren lassen. Mit anderen Worten, die Kopie kann „nah genug“ an das Original herankommen, um jeden erdenklichen Zweck zu erfüllen – einschließlich des Turing-Tests. Des Weiteren liegt die für eine effiziente Implementierung mathematischer Modelle erforderliche Rechenkapazität weit unter dem theoretischen Rechenpotenzial der modellierten biologischen Neuronenverbände. Um dies zu veranschaulichen, habe ich in **Kapitel 4** einige Modelle von Gehirnregionen vorgestellt (unter anderem Watts auditorische Regionen und das Kleinhirn).

Komplexität des Gehirns. Thomas Ray weist darauf hin, dass es schwierig sein könnte, ein System zu erzeugen, das „Milliarden von Codezeilen“ entspricht – denn dies ist die Komplexität, die er dem Gehirn beimisst. Doch das ist stark übertrieben, denn wie wir gesehen haben, gehen unsere Gehirne aus einem Genom mit dreißig bis einhundert Millionen Bytes an nichtredundanten Informationen (achthundert Millionen Bytes ohne Kompression, doch angesichts der hohen Redundanz ist Kompression möglich) hervor, von denen vielleicht zwei Drittel die Funktionsweise des Gehirns beschreiben. Prozesse der Selbstorganisation, in denen Zufall (und Umwelteinflüsse) eine große Rolle spielen, sorgen dafür, dass diese relativ kleine Menge an anfänglichen Informationen zu den Billiarden von Bytes

an Informationen heranwächst, die ein ausgewachsenes Gehirn umfasst. Dementsprechend werden nichtbiologische Wesen mit menschlicher Intelligenz nicht in riesigen Expertensystemen mit Milliarden von Regeln und Codezeilen bestehen, sondern vielmehr in lernenden, chaotischen, selbstorganisierenden Systemen, die biologisch inspiriert sind.

Ray schreibt weiter: „Die Techniker unter uns würden vielleicht nanomolekulare Geräte mit Fulleren-Schaltungen oder sogar DNS-artige Computer vorschlagen. Doch sie würden niemals an Neuronen denken. Neuronen sind Strukturen von astronomischem Ausmaß, verglichen mit den Molekülen, bei denen wir anfangen.“

Das ist ganz meine Meinung. Der Sinn des Reverse Engineering des Gehirns ist nicht, den Stoffwechsel oder andere sperrige Prozesse biologischer Neuronen zu kopieren, sondern die entscheidenden Prinzipien der Informationsverarbeitung zu verstehen. Dass dies machbar ist, beweisen Dutzende aktuelle Projekte. Die Komplexität emulierter Neuronenverbände vergrößert sich um ganze Größenordnungen – ebenso wie alle anderen technischen Leistungsgrößen.

Die inhärente Dualität von Computern. Der Neurowissenschaftler Anthony Bell (Redwood Neuroscience Institute) benennt zwei große Schwierigkeiten bei der Modellierung und Simulation des Gehirns durch Computer. Erstens:

Ein Computer ist ein durchweg dualistisches Ding, das Berechnungen ausführt, mit einer physischen Konfiguration, die darauf ausgelegt ist, nicht mit seiner logischen Konfiguration zu interferieren. Empirische Untersuchungen zeigen, dass das Gehirn kein dualistisches Ding ist. Computer und Programm mögen verschieden sein, doch Geist und Gehirn sind eins. Das Gehirn ist somit keine Maschine, das heißt, es ist nicht ein endliches Modell (oder Computer), das physisch so aufgebaut ist, dass seine physische Instanz nicht mit der Ausführung des Modells (oder Programms) interferiert.¹⁸

Dieses Argument ist schnell ausgeräumt. Die Möglichkeit, bei Computern das Programm von der physischen Instanz, die alle Berechnungen durchführt, zu trennen, ist keine Einschränkung, sondern ein Vorteil. Zunächst einmal gibt es elektronische Geräte mit eigenem Stromkreis, in denen „Computer und Programm“ nicht getrennt, sondern eins sind. Solche Geräte sind nicht programmierbar, sondern für bestimmte Funktionen fest verdrahtet. Ich spreche dabei nicht nur von Computern mit

Software (sogenannter „Firmware“) in schreibgeschütztem Speicher, wie sie sich in Mobiltelefonen oder Pocket Computern findet. In solchen Systemen könnten Elektronik und Software immer noch als dualistisch betrachtet werden, auch wenn sich das Programm nicht ohne Weiteres modifizieren lässt.

Ich meine jedoch Systeme mit dedizierter Logik, die überhaupt nicht programmierbar sind – beispielsweise anwendungsspezifische Mikrochips (die beispielsweise für Bild- und Signalverarbeitung benutzt werden). Algorithmen können auf diese Weise kosteneffizienter implementiert werden, und in vielen elektronischen Konsumgeräten finden sich solche Chips. Programmierbare Computer sind teurer, können jedoch die Funktionalität dedizierter Systeme emulieren, einschließlich der Algorithmen, die wir (im Zuge des Reverse Engineering des Gehirns) für Neuronenkomponenten, Neuronen und Gehirnregionen finden.

Es ist nicht berechtigt, ein System, dessen logischer Algorithmus an den physischen Aufbau dieses Systems gebunden ist, als „keine Maschine“ zu bezeichnen. Denn wenn wir die Funktionsweise dieses Systems verstehen, mathematisch modellieren und dann in einem anderen System reinstanciieren können (sei es nun eine Maschine mit unveränderlicher dedizierter Logik oder Software auf einem programmierbaren Computer), so können wir auch ersteres System als Maschine betrachten, auf alle Fälle aber als etwas, das in maschineller Form reproduzierbar ist. Wie in **Kapitel 4** eingehend besprochen sind uns keine Grenzen gesetzt, wenn es darum geht, die Funktionsprinzipien des Gehirns zu ergründen und sie von der Molekülebene aufwärts zu modellieren und zu simulieren.

Bell spricht von der „physischen Konfiguration [eines Computers, die] darauf ausgelegt ist, nicht mit seiner logischen Konfiguration zu interferieren“; das Gehirn habe diese „Einschränkung“ nicht. Es stimmt, dass unsere Gedanken unser Gehirn mitgestalten – ein Phänomen, das wir, wie zuvor beschrieben, in dynamischen Gehirnschans beobachten können. Doch wir können die physischen und logischen Aspekte der Gehirnplastizität problemlos in Software modellieren. Die Trennbarkeit der Software eines Computers von seiner physischen Instanziierung ist ein Vorteil, da hierdurch dieselbe Software auf immer bessere Hardware

übertragen werden kann. Computersoftware kann sich einerseits wie das Gehirn selbst anpassen, andererseits auch durch Upgrades verbessert werden.

Ebenso kann Computerhardware erneuert werden, ohne dass die Software angepasst werden muss. Die starre Architektur des Gehirns dagegen ist recht eingeschränkt. Das Gehirn kann zwar neue Verknüpfungen und Neurotransmittermuster ausbilden, doch es bleibt beschränkt auf chemische Signalverarbeitung, die über eine Million Mal langsamer ist als Elektronik, auf die begrenzte Anzahl von Neuronenbindungen, die in unserem Schädel Platz finden, und auf die Unfähigkeit zu Upgrades – abgesehen von der besprochenen Verschmelzung mit nichtbiologischer Intelligenz.

Ebenen und Schleifen. Bell spricht auch über die scheinbare Komplexität des Gehirns:

Molekulare und biophysische Vorgänge bestimmen die Empfindlichkeit von Neuronen für eingehende Aktionspotenziale (also die synaptische Effizienz und die postsynaptische Erregung), die Anregbarkeit des Neurons zu eigenen Aktionspotenzialen, die Signalmuster, die es erzeugt, und die Wahrscheinlichkeit für das Entstehen neuer Synapsen, um nur vier der wichtigsten subneuronalen Einflüsse zu nennen. Zudem haben transneuronale Effekte, wie lokale elektrische Felder und Membrandiffusion von Stickoxid, direkten Einfluss auf die neuronale Aktivität sowie auf die Energieversorgung (Durchblutung) von Zellen, welche wiederum direkt mit der Aktivität korreliert.

Diese Liste ließe sich beliebig fortführen. Ich denke, wenn man sich ernsthaft mit Neuromodulatoren, Ionenkanälen oder synaptischen Mechanismen beschäftigt, muss man, wenn man ehrlich ist, zugeben, dass die Neuronenebene zwar als Beschreibungsebene, aber nicht als eigenständige Berechnungsebene infrage kommt.¹⁹

Bell hat zwar recht damit, dass das Neuron nicht die richtige Ebene für die Simulation des Gehirns ist, doch sein Hauptargument ähnelt dem obengenannten von Thomas Ray: das Gehirn ist komplizierter als simple Logikgatter.

Dies bringt er explizit zum Ausdruck:

Es wäre eindeutig albern, zu behaupten, dass ein einzelnes Stück Wasserstruktur oder eine einzelne Quantenkohärenz ein notwendiges Detail für die funktionale Beschreibung des Gehirns darstellt. Doch wenn Moleküle in jeder Zelle durch diese submolekularen Prozesse in ihrer Funktion beeinflusst werden und wenn diese Prozesse fortwährend im ganzen Gehirn dazu dienen, um räumlich-zeitliche Korrelationen molekularer Fluktuationen widerzuspiegeln, aufzuzeichnen und weiterzuvermitteln, um die Wahrscheinlichkeiten und

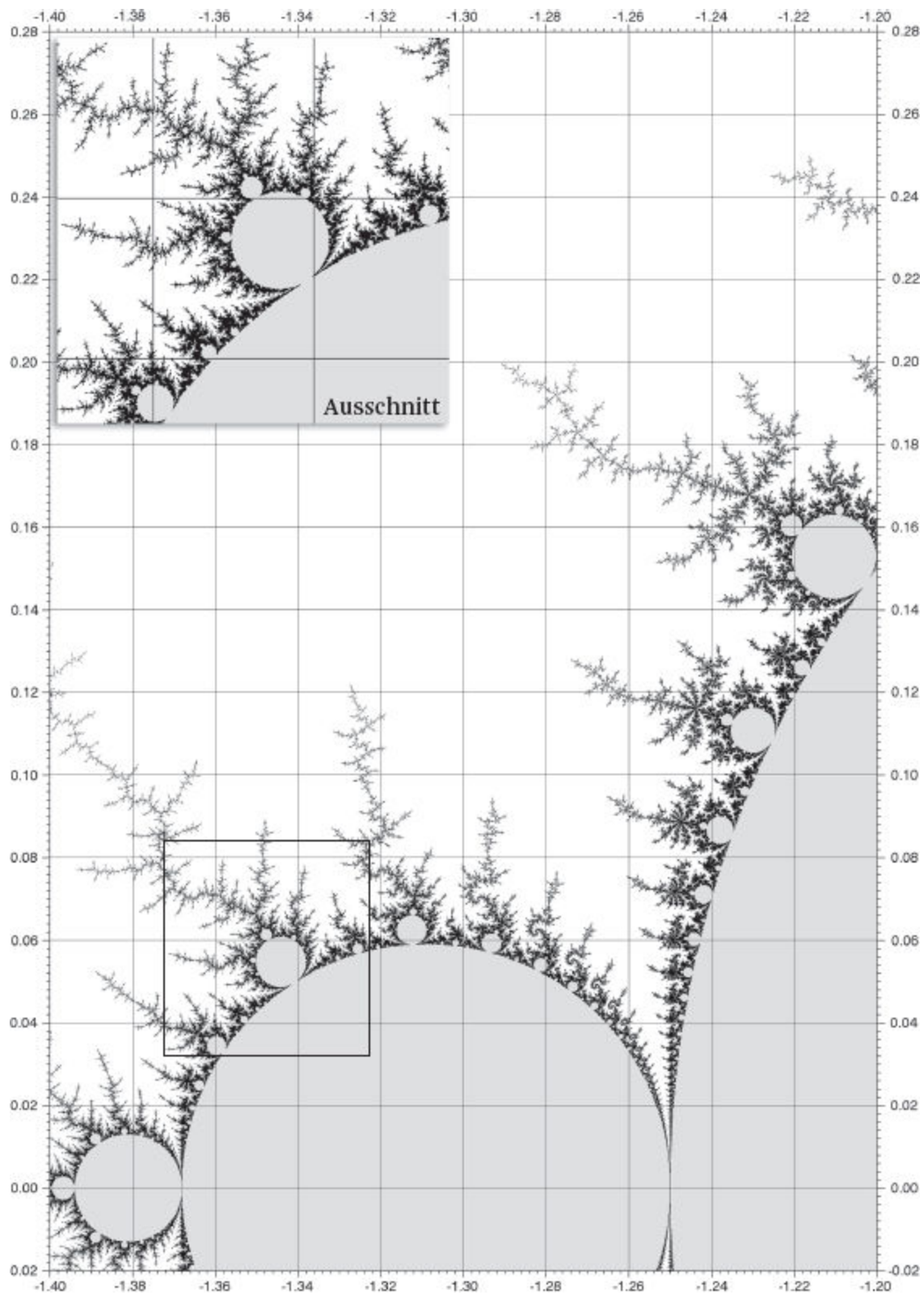
Ausprägung dieser Reaktionen zu erhöhen oder zu verringern, dann haben wir eine Situation, die sich qualitativ vom Logikgatter unterscheidet.

Auf der einen Ebene kritisiert Bell die vereinfachten Modelle von Neuronen und Neuronenbindungen, die in vielen künstlichen neuronalen Netzen zum Einsatz kommen. Simulationen von Gehirnregionen beruhen jedoch nicht auf diesen vereinfachten Modellen, sondern auf realistischen mathematischen Modellen, die das Ergebnis des Reverse Engineering des Gehirns sind.

Bells eigentliche Aussage lautet, das Gehirn sei enorm kompliziert und seine Funktionalität folglich äußerst schwer zu verstehen, zu modellieren und zu simulieren. Das Hauptproblem mit Bells Sichtweise ist, dass sie der selbstorganisierenden, chaotischen und fraktalen Natur des Gehirnaufbaus nicht Rechnung trägt. Es besteht kein Zweifel daran, dass das Gehirn komplex ist – doch ein großer Teil dieser Komplexität ist nur oberflächlich. In anderen Worten, die Prinzipien, nach denen das Gehirn aufgebaut ist, sind einfacher als sie scheinen.

Um das zu verstehen wollen wir zunächst die in **Kapitel 2** besprochene fraktale Natur des Gehirnaufbaus betrachten. Ein Fraktal ist eine Regel, die iterativ angewandt wird, um ein Muster oder eine bestimmte Struktur zu erzeugen. Die Regel ist oft einfach, doch durch die Iteration kann ihr Produkt bemerkenswert komplex ausfallen. Ein berühmtes Beispiel ist die von dem Mathematiker Benoit Mandelbrot entworfene Mandelbrot-Menge.²⁰ Visuelle Darstellungen der Mandelbrot-Menge sind bemerkenswert komplex und enthalten endlos verschachtelte Strukturen. Egal, wie tief wir ins Detail gehen, Bilder von der Mandelbrot-Menge bleiben immer komplex, und wir finden nur immer noch feinere Komplexität vor. Und doch ist die grundlegende Formel erstaunlich simpel: Die Mandelbrot-Menge wird allein durch die Formel $Z = Z^2 + C$ beschrieben, wobei Z eine „komplexe“ (also zweidimensionale) Zahl und C eine Konstante ist. Die Formel wird iterativ angewandt und die resultierenden zweidimensionalen Punkte werden aufgetragen, wodurch das Muster entsteht.

Die Mandelbrot-Menge



Der Punkt ist, dass eine einfache Konstruktionsregel eine große Menge scheinbarer Komplexität erzeugen kann. Das zeigt auch Stephen Wolfram anhand einfacher Regeln in Zellulären Automaten (siehe **Kapitel 2**). Diese Beobachtung trifft auch auf das menschliche Gehirn zu. Wie besprochen ist das komprimierte Genom relativ kompakt, kleiner als so manche moderne PC-Software. Wie Bell bemerkt, scheint das Gehirn in seiner tatsächlichen Ausprägung weitaus komplexer zu sein. Genau wie bei der Mandelbrot-Menge stoßen wir, indem wir immer feinere Einzelheiten des Gehirns betrachten, auf immer mehr scheinbare Komplexität auf allen Ebenen. Auf der makroskopischen Ebene sehen wir scheinbar komplizierte Verbindungsmuster, auf der mikroskopischen Ebene erscheinen die Einzelteile eines Neurons, beispielsweise Dendriten, ebenso komplex. Ich habe gesagt, dass man Milliarden von Bytes bräuchte, um den Zustand eines Menschengehirns zu beschreiben, doch das Prinzip dahinter umfasst nur einige zehn Millionen Bytes. Das Verhältnis der scheinbaren Komplexität des Gehirns zu den Informationen seines Aufbaus beträgt somit mindestens einhundert Millionen zu eins. Die Informationen im Gehirn sind zunächst weitgehend zufällig, doch durch Interaktion des Gehirns mit einer komplexen Umgebung (also durch Lernen und Erfahren) werden daraus sinnvolle Informationen.

Die tatsächliche Komplexität des Aufbaus ist durch die komprimierten Konstruktionsinformationen bestimmt (also vom Genom und seinem molekularen Apparat), nicht von den Mustern, die durch iterative Anwendung der Konstruktionsregeln entstehen. Ich gebe zu, dass auch die etwa dreißig bis hundert Millionen Bytes an Informationen im Genom keine allzu einfache Konstruktionsbeschreibung darstellen (allemaal komplexer als die Gleichung der Mandelbrot-Menge), doch handelt es sich dabei um einen Komplexitätsumfang, den wir mit unserer Technik bereits beherrschen können. Viele Beobachter lassen sich von der scheinbaren Komplexität der physischen Ausprägung des Gehirns täuschen und verkennen dabei, dass die eigentlichen Aufbauinformationen aufgrund ihrer fraktalen Natur weitaus einfacher sind als das, was im Gehirn zu sehen ist.

In **Kapitel 2** habe ich außerdem geschrieben, dass die Aufbauinformationen probabilistisch fraktal sind, was heißt, dass die

Regeln bei jeder neuen Iteration mit einer gewissen Zufälligkeit angewandt werden. Das Genom enthält beispielsweise sehr wenig Informationen über das Verknüpfungsmuster des Kleinhirns, welches mehr als die Hälfte der Gehirneuronen ausmacht. Eine kleine Anzahl von Genen beschreibt das grundsätzliche Muster der vier Zellarten des Kleinhirns und sagt dann quasi: „Wiederhole dieses Muster mehrere Milliarden Male mit etwas zufälliger Variation bei jeder Wiederholung.“ Das Ergebnis mag sehr kompliziert aussehen, doch die Aufbauinformation ist relativ kompakt.

Bell hat recht damit, dass es frustrierend wäre, den Aufbau des Gehirns mit einem konventionellen Computer zu vergleichen. Das Gehirn folgt keinem typischen (modularen) Top-Down-Design. Es erzeugt durch eine probabilistische, fraktale Art von Organisation Prozesse, die chaotisch sind – das heißt, nicht ganz berechenbar. Es gibt hochentwickelte mathematische Werkzeuge für die Modellierung und Simulation chaotischer Systeme, die eingesetzt werden um Phänomene wie das Wetter oder den Finanzmarkt zu untersuchen – diese Werkzeuge lassen sich auch auf das Gehirn anwenden.

Bell erwähnt diesen Ansatz mit keinem Wort. Er stellt fest, dass das Gehirn sich drastisch von konventionellen Logikgattern und konventioneller Software unterscheidet, und zieht daraus unberechtigtweise den Schluss, das Gehirn sei keine Maschine und auch nicht durch eine solche modellierbar. Er hat zwar recht, dass herkömmliche Logikgatter und konventionelle modulare Software nicht der richtige Weg sind, über das Gehirn nachzudenken. Das bedeutet jedoch nicht, dass wir nicht in der Lage sind, das Gehirn auf einem Computer zu simulieren. Da wir die Funktionsprinzipien des Gehirns mathematisch beschreiben und jeden mathematischen Prozess (einschließlich chaotischer Prozesse) auf Computern modellieren können, sind wir durchaus in der Lage diese Simulationen zu erstellen. Und tatsächlich machen wir bereits solide und immer schnellere Fortschritte in dieser Richtung.

Trotz seiner Skepsis äußert sich Bell verhalten optimistisch, was unsere Fähigkeit anbelangt, unsere Biologie und unser Gehirn zu verstehen und zu verbessern. Er schreibt: „Wird es ein transhumanes Zeitalter geben? Es gibt biologische Präzedenzfälle für so etwas, und zwar die beiden großen Entwicklungsschritte der natürlichen Evolution. Erstens, die Ansiedlung

prokaryotischer Symbionten in eukariotischen Bakterien, und zweitens, die Entstehung mehrzelliger Lebensformen aus Eukariotenkolonien. [...] Ich glaube, dass so etwas [wie ein transhumanes Zeitalter] auf uns zukommen könnte.“

Kritik zu Mikrotubuli und Quantenberechnung

Quantenmechanik ist mysteriös und Bewusstsein ist mysteriös. Q.E.D.: Quantenmechanik und Bewusstsein müssen etwas miteinander zu tun haben.

CHRISTOF KOCH, ÜBER ROGER PENROSES THEORIE, QUANTENBERECHNUNGEN IN NEUROTUBULI SEIEN DER URSPRUNG DES MENSCHLICHEN BEWUSSTSEINS²¹

Über das letzte Jahrzehnt hinweg vertrat Roger Penrose, ein renommierter Physiker und Philosoph, zusammen mit dem Anästhesisten Stuart Hameroff die Vermutung, dass die sogenannten Mikrotubuli (Feinstrukturen in Neuronen) eine besondere Art von Berechnung, sogenannte „Quantenberechnung“, ausführen. Wie zuvor besprochen beruht Quantenberechnung auf sogenannten Qbits, welche alle möglichen Zustände gleichzeitig einnehmen. Diese Methode kann als extreme Form von Parallelverarbeitung betrachtet werden (weil alle Kombinationen von Qbit-Werten gleichzeitig getestet werden). Penrose glaubt, dass die Quantenberechnungen der Mikrotubuli den Nachbau von Neuronen und das Erzeugen von mentalen Dateien erschweren.²² Er vermutet außerdem, dass Quantenberechnungen im Gehirn für das Bewusstsein verantwortlich sind, und dass Systeme – ob biologisch oder nicht – ohne Quantenberechnung nicht bewusst sein können.

Einige Wissenschaftler vermeldeten zwar die Beobachtung des Kollapses einer Wellenfunktion (die Reduktion überlagerter Zustände, wie Position, Spin und Geschwindigkeit) im Gehirn, doch keiner von ihnen kam dabei auf die Idee, dass menschliche Fähigkeiten Quantenberechnung erfordern. Der Physiker Seth Lloyd:

Ich halte es für falsch, dass Mikrotubuli im Gehirn Berechnungen in der von [Penrose] und Hameroff beschriebenen Weise ausführen. Das Gehirn ist ein warmer, feuchter Ort. Es ist keine sonderlich günstige Umgebung um Quantenkohärenzen auszunutzen. Die Art von

Überlagerung und Ver-/Entknüpfung von Mikrotubuli, nach der sie suchen, scheint nichts mit Quantenverschränkung zu tun zu haben. [...] Das Gehirn ist eindeutig kein klassischer digitaler Computer. Doch ich vermute, dass es die meisten seiner Aufgaben in „klassischer“ Weise ausführt. Wenn man einen ausreichend großen Computer hätte und alle Neuronen, Dendriten, Synapsen und dergleichen modellieren würde, [so] könnte man das Ding vermutlich die meisten Tätigkeiten des Gehirns ausführen lassen. Ich denke nicht, dass das Gehirn irgendwelche quantenmechanischen Effekte für seine Aufgaben nutzt.²³

Anthony Bell bemerkt außerdem, dass „es im Gehirn keine Hinweise auf makroskopische Quantenkohärenz wie in Suprafluiden oder Supraleitern gibt.“²⁴

Selbst wenn das Gehirn tatsächlich Quantenberechnungen ausführt, so ändert das nicht notwendigerweise etwas an der Machbarkeit von Computerintelligenz auf menschlichem (und höherem) Niveau oder von Gehirnaploads. Würde sich herausstellen, dass das Gehirn Quantenberechnungen ausführt, so würde das zunächst einmal nur zeigen, dass Quantencomputer möglich sind. Keinesfalls wäre damit gesagt, dass Quantenberechnung auf biologische Systeme beschränkt ist. Biologische Quantenberechnungs-Mechanismen können, falls sie existieren, nachgebaut werden. Tatsächlich gab es bereits erfolgreiche Experimente mit Quantencomputern in kleinem Maßstab – und auch gewöhnliche Transistoren beruhen auf dem quantenmechanischen Tunneleffekt.

Penroses Position wurde dahingehend interpretiert, dass es unmöglich ist, eine Menge von Quantenzuständen perfekt zu replizieren, weshalb auch ein perfekter Download unmöglich ist. Doch wie perfekt muss ein Download überhaupt sein? Wenn wir Downloadtechniken entwickelten, mit denen die „Kopie“ dem Original ebenso ähnlich ist wie die Person sich selbst nach Ablauf einer Minute, so wäre das für jeden erdenklichen Zweck ausreichend und würde keinerlei Replikation von Quantenzuständen erfordern. Indem sich die Technik verbessert wird die Kopie dem Original immer ähnlicher sein – so ähnlich, wie das Original sich selbst nach Ablauf immer kürzerer Zeitspannen (eine Sekunde, eine Millisekunde, eine Mikrosekunde).

Als man Penrose darauf hinwies, dass Neuronen (und selbst ihre Verbindungen) für Quantenberechnungen zu groß sind, benannte er die Mikrotubuli als möglichen Mechanismus für Quantenberechnung. Wenn

man nach Hürden für die Replikation der Gehirnfunktionen sucht, klingt diese Theorie genial – sie weist jedoch keine wirklichen Hindernisse auf. Ohnehin gibt es kaum Hinweise darauf, dass die für die strukturelle Integrität von Nervenzellen verantwortlichen Mikrotubuli Quantenberechnungen ausführen, und dass derartige Vorgänge Einfluss auf den Denkprozess haben. Selbst großzügigere Modelle des menschlichen Wissens und Könnens lassen sich bei der gegebenen Gehirngröße problemlos anhand aktueller Neuronenmodelle erklären, in denen keine Quantenberechnungen vorkommen. Experimente zeigen, dass teilweise nichtbiologische Hybridnetze ebenso gut funktionieren wie rein biologische Netze, was darauf hindeutet, dass unsere aktuellen Neuronenmodelle angemessen sind. Lloyds Software-Simulation seines ausgefeilten Modells des menschlichen auditorischen Systems kommt mit mehreren Größenordnungen weniger Rechenkapazität aus als die Neuronennetze, die er simuliert – und auch hier gibt es keinerlei Hinweise auf die Notwendigkeit von Quantenberechnung. In **Kapitel 4** habe ich weitere Projekte zur Modellierung und Simulation von Gehirnregionen angeführt; in **Kapitel 3** habe ich Abschätzungen der Rechenleistung erläutert, welche nötig ist, um sämtliche Gehirnregionen durch funktionale Simulation der einzelnen Regionen zu simulieren. Keine dieser Analysen deutet darauf hin, dass Quantenberechnungen nötig sind um die menschlichen Fähigkeiten zu gewährleisten.

Einige detaillierte Nervenzellmodelle (insbesondere die von Penrose und Hameroff) weisen den Mikrotubuli eine Rolle bei der Funktion und dem Wachstum von Dendriten und Axonen zu. Erfolgreiche neuromorphe Modelle von neuronalen Regionen scheinen jedoch ohne Mikrotubuli auszukommen. Für Modelle, die Mikrotubuli berücksichtigen, scheint es auszureichen, deren chaotisches Verhalten allgemein zu modellieren, ohne jedes einzelne Mikrotubulus-Filament zu modellieren. Und selbst wenn die Penrose-Hameroff-Tubuli tatsächlich von Bedeutung sein sollten, so hätten sie keinen nennenswerten Einfluss auf die beschriebenen Hochrechnungen. Selbst wenn Mikrotubuli die Komplexität von Neuronen um einen Faktor von eintausend erhöhen würden (man bedenke dabei, dass unsere aktuellen Neuronenmodelle mit um die tausend Verbindungen pro Neuron, mehreren

Nichtlinearitäten und anderen Details bereits sehr komplex sind), so würde dies meinen Wachstumsmodellen zufolge das Erreichen der Rechenkapazität des Gehirns um gerade einmal neun Jahre hinauszögern. Wenn wir die Komplexität mit einem Faktor von einer Million multiplizieren, so beträgt die Verzögerung siebzehn Jahre. Bei einem Faktor von einer Milliarde sind es vierundzwanzig Jahre (denn die Rechenleistung wächst doppelt exponentiell).²⁵

Die Church-Turing-These

Im frühen zwanzigsten Jahrhundert veröffentlichten die Mathematiker Alfred North Whitehead und Bertrand Russell ihr wegweisendes Werk *Principia Mathematica*, in welchem sie nach Axiomen suchten, die als einheitliche Grundlage der gesamten Mathematik dienen können.²⁶ Es gelang ihnen jedoch nicht, stichhaltig zu zeigen, dass ein Axiomsystem, das die natürlichen Zahlen (positive Ganzzahlen) beschreibt, widerspruchsfrei sein kann. Man ging davon aus, dass ein solcher Beweis früher oder später gefunden würde, doch in den 1930ern erschütterte ein junger Tscheche namens Kurt Gödel die Welt der Mathematik mit dem Beweis, dass es in einem solchen System immer Aussagen gibt, die weder beweisbar noch widerlegbar sind. Später wurde zudem gezeigt, dass solche unbeweisbaren Aussagen ebenso häufig sind wie beweisbare. Der Gödelsche Unvollständigkeitssatz ist der fundamentale Beweis, dass der mathematischen Logik – und somit auch der Berechenbarkeit – definitive Grenzen gesetzt sind. Er wurde oft als wichtigster Satz der Mathematik bezeichnet, und seine Konsequenzen sind bis heute Diskussionsgegenstand.²⁷

Zu einer ähnlichen Erkenntnis gelangte Alan Turing in Bezug auf Berechnungen. Als Turing 1936 mit der Turingmaschine (siehe **Kapitel 2**) jenes theoretische ComputermodeLL präsentierte, das bis heute die Grundlage der Berechenbarkeitstheorie bildet, berichtete er von einer unerwarteten Entdeckung, die an Gödels Satz erinnert.²⁸ Turing beschrieb das Konzept nicht entscheidbarer Probleme, das heißt wohldefinierter

Probleme, die erwiesenermaßen eine einzige Lösung haben, welche aber nicht auf einer Turingmaschine berechnet werden kann.

Die Tatsache, dass es Probleme gibt, die von einer bestimmten theoretischen Maschine nicht gelöst werden können, mag für sich genommen nicht sehr verblüffend erscheinen – die volle Tragweite offenbart sich jedoch im Zusammenhang mit Turings anderer Feststellung, dass jeder beliebige Berechnungsprozess durch eine Turingmaschine modellierbar ist. Turing zeigte, dass die Menge unentscheidbarer Probleme ebenso groß ist wie die Menge entscheidbarer Probleme, nämlich abzählbar unendlich (das heißt, so groß wie die Menge der natürlichen Zahlen – die niedrigste Ordnung von Unendlichkeit). Turing zeigte weiterhin, dass ein unentscheidbares Problem darin besteht, in einem beliebigen logischen System, das mächtig genug ist, um die natürlichen Zahlen darzustellen, über die Wahrheit oder Falschheit einer logischen Aussage zu entscheiden. (In anderen Worten, es gibt keine Prozedur, die über alle logischen Aussagen entscheiden könnte). Dieses Ergebnis hat Ähnlichkeit mit dem Gödelschen Unvollständigkeitssatz.

Etwa um dieselbe Zeit publizierte der amerikanische Mathematiker und Philosoph Alonzo Church ein Theorem zu einer ähnlichen Frage auf dem Gebiet der Arithmetik. Church kam unabhängig von Turing zum selben Schluss.²⁹ Die Arbeiten von Turing, Church und Gödel lieferten erstmals formale Beweise dafür, dass Logik, Mathematik und Berechnungen klare Grenzen haben.

Außerdem formulierten Church und Turing unabhängig voneinander eine These – heute bekannt als Church-Turing-These –, die auf unterschiedliche Weise interpretiert werden kann. Die schwache Interpretation lautet: Ein Problem, das für eine Turingmaschine formulierbar, aber von einer solchen nicht lösbar ist, ist für keine Maschine lösbar. Dies folgt aus Turings Ausführung, dass die Turingmaschine jeden algorithmischen Prozess modellieren kann. Von da aus fehlt nur noch der verhältnismäßig kleine Schritt zu zeigen, dass das Verhalten jeder Maschine einem Algorithmus folgt.

Die starke Interpretation lautet, dass ein Problem, das nicht durch eine Turingmaschine lösbar ist, auch nicht durch menschliches Denken gelöst

werden kann. Die Idee dahinter ist, dass menschliches Denken durch das menschliche Gehirn ausgeführt wird (mit einigem Einfluss des Körpers), dass das Gehirn (und der Körper) aus Materie und Energie besteht, dass Materie und Energie den Naturgesetzen gehorchen, dass diese Gesetze mathematisch beschreibbar sind, und dass Mathematik mit beliebiger Genauigkeit durch Algorithmen simulierbar ist. Folglich existiert auch ein Algorithmus, der das menschliche Denken simuliert. Die starke Interpretation der Church-Turing-These postuliert im Grunde eine Äquivalenz zwischen Denkbarkeit und Berechenbarkeit.

Während die Existenz von nicht Turing-entscheidbaren Problemen eine mathematische Tatsache ist, stellt die Church-Turing-These keine mathematische Aussage dar. Es handelt sich dabei vielmehr um eine Vermutung, die in verschiedentlich abgewandelter Form immer wieder als zentraler Aspekt von geistesphilosophischen Debatten auftaucht.³⁰

Die Kritik an starker KI aufgrund der Church-Turing-These lautet wie folgt: Da es eindeutig Probleme gibt, die Computer nicht lösen können, Menschen hingegen in der Lage sind, diese Probleme zu lösen, liegt auf der Hand, dass Maschinen niemals menschliche Intelligenz in vollem Umfang erlangen können. Dies ist jedoch ein Trugschluss. Menschen sind keinesfalls in der Lage, solcherlei „unlösbaren“ Probleme generell zu lösen. Wir können fundierte Vermutungen über die Lösung bestimmter Probleminstanzen anstellen und heuristische Methoden (Prozeduren, die ohne Erfolgsgarantie nach einer Lösung suchen) anwenden, die in manchen Fällen erfolgreich sind. Doch auch diese beiden Ansätze sind algorithmische Prozesse, das heißt, ihr Einsatz ist auch in Maschinen möglich. Tatsächlich können Maschinen oft schneller und gründlicher nach Lösungen suchen als Menschen.

Die starke Church-Turing-These besagt, dass biologische Gehirne und Maschinen gleichermaßen den Gesetzen der Physik unterworfen sind und somit in gleichem Umfang mathematisch modelliert und simuliert werden können. Wir haben bereits gezeigt, dass sich die Funktion von Neuronen modellieren und simulieren lässt – warum nicht auch ein System mit hundert Milliarden Neuronen? Ein solches System wäre ebenso komplex und unberechenbar wie die menschliche Intelligenz. Wir verfügen bereits

über Computeralgorithmen, die komplexe und unvorhersehbare Ergebnisse liefern und intelligente Lösungen für Probleme finden (beispielsweise genetische Algorithmen). Wenn sich etwas aus der Church-Turing-These schließen lässt, dann, dass Gehirne und Maschinen prinzipiell äquivalent sind.

Die Fähigkeit von Maschinen, heuristische Methoden anzuwenden, lässt sich anhand eines der interessantesten unentscheidbaren Probleme demonstrieren, welches 1962 von Tibor Rado formuliert wurde: die Bestimmung von „fleißigen Bibern“.³¹ Jede Turingmaschine hat eine bestimmte Anzahl von Zuständen, in denen sich ihr internes Programm befinden kann, welche der Anzahl von Programmschritten dieses Programms entspricht. Es gibt eine gewisse Anzahl möglicher Turingmaschinen mit 4 Zuständen, eine gewisse Anzahl möglicher Turingmaschinen mit 5 Zuständen und so weiter. Um den „fleißigen Biber“ für eine gegebene Anzahl von n Zuständen zu finden, konstruieren wir zunächst sämtliche Turingmaschinen mit n Zuständen. Die Menge solcher Maschinen ist immer endlich. Dann eliminieren wir sämtliche Maschinen, die in Endlosschleifen geraten (und niemals anhalten). Schließlich wählen wir (unter den Maschinen, die irgendwann anhalten) die Maschine aus, welche die größte Anzahl von Einsen aufs Band schreibt. Die Anzahl der von dieser Maschine geschriebenen Einsen ist der fleißige Biber von n . Rado hat gezeigt, dass es keinen Algorithmus – und somit keine Turingmaschine – gibt, der diese Funktion für alle n berechnen kann. Die Schwierigkeit besteht darin, diejenigen Maschinen auszusortieren, die in Endlosschleifen geraten. Wenn wir eine Turingmaschine programmieren würden, sämtliche Turingmaschinen mit n Zuständen zu generieren und zu simulieren, so würde sich dieser Simulator *selbst* in einer Endlosschleife verfangen, sobald er versucht, eine Maschine zu simulieren, die niemals anhält.

Obwohl es sich um ein unentscheidbares Problem handelt (übrigens um eines der berühmtesten), können wir für einige n den fleißigen Biber bestimmen. (Interessanterweise ist die Bestimmung von Zustandszahlen, für die wir den fleißigen Biber bestimmen können, ebenfalls ein unentscheidbares Problem). Der fleißige Biber für 6 ist beispielsweise

schnell gefunden und beträgt 35. Ab sieben Zuständen können Turingmaschinen multiplizieren, darum ist der fleißige Biber für 7 deutlich größer: 22.961. Turingmaschinen mit acht Zuständen können Potenzen berechnen, der fleißige Biber für 8 liegt darum bei etwa 10^{43} . Wie man sieht, handelt es sich um eine „intelligente“ Funktion, da die Lösung für größere n größere Intelligenz erfordert.

Spätestens mit 10 Zuständen können Turingmaschinen Berechnungen durchführen, die für einen Menschen (ohne Computerunterstützung) nicht mehr nachvollziehbar sind. Um den fleißigen Biber von 10 zu berechnen, brauchen wir die Hilfe von Computern. Die Antwort lässt sich allerdings nur in einer exotischen Notation darstellen, mit einem Stapel von verschachtelten Exponenten, dessen Höhe durch einen weiteren Stapel von Exponenten bestimmt ist, dessen Höhe wiederum durch weitere Exponenten bestimmt ist, und so weiter. Da ein Computer im Gegensatz zum Menschen mit derlei komplexen Werten umgehen kann, scheint es so, als wären Computer letztlich besser für das Lösen nicht entscheidbarer Probleme geeignet.

Kritik zu Fehlerquoten

Jaron Lanier, Thomas Ray und andere Beobachter führen die hohen Ausfallraten der Technik als Hindernis für exponentielles Wachstum an. Ray schreibt zum Beispiel:

Die komplexesten unserer Kreationen weisen alarmierende Fehlerraten auf. Satelliten und Weltraumteleskope, Space Shuttles, interplanetarische Raumsonden, der Pentium-Chip und Computerbetriebssysteme scheinen allesamt die Grenzen dessen zu erweitern, was mit konventionellen Ansätzen konzipiert und gebaut werden kann. [...] Unsere komplexeste Software (Betriebssysteme und Systeme zur Telekommunikationssteuerung) umfassen bereits mehrere zehn Millionen Zeilen Programmcode. Derzeit erscheint es unwahrscheinlich, dass wir Software mit Millionen oder Milliarden von Codezeilen produzieren und beherrschen können.³²

Zunächst lässt sich fragen, auf welche alarmierenden Fehlerraten Ray sich genau bezieht. Computersysteme von gehöriger Komplexität fliegen und landen tagtäglich Flugzeuge und überwachen Intensivstationen in Krankenhäusern – und versagen so gut wie nie. Alarmierende Fehlerraten sind viel öfter auf menschliches Versagen zurückzuführen. Ray spielt auf Schwierigkeiten mit dem Pentium-Prozessor an, doch dabei handelte es sich um äußerst geringfügige Probleme ohne größere Auswirkungen, die schnell behoben wurden.

Die Komplexität von Computersystemen nimmt tatsächlich unaufhaltsam zu, und wie wir gesehen haben kommen bei unseren Versuchen, menschliche Intelligenz zu emulieren, immer mehr der selbstorganisierenden Muster zum Einsatz, die wir im menschlichen Gehirn vorfinden. Indem wir das Reverse Engineering des menschlichen Gehirns fortsetzen, werden wir unserem Baukasten für künstliche Mustererkennung und KI neue selbstorganisierende Methoden hinzufügen. Wie zuvor besprochen ermöglichen uns selbstorganisierende Methoden neue, höhere Komplexitätsebenen zu beherrschen. Wie schon erwähnt brauchen wir keine Systeme mit „Milliarden von Codezeilen“ um menschliche Intelligenz zu emulieren.

Zuletzt sei noch gesagt, dass Unvollkommenheit ein inhärentes Merkmal jedes komplexen Prozesses ist – was mit Sicherheit die menschliche Intelligenz mit einschließt.

Lock-in-Effekt

Jaron Lanier und andere Kritiker verweisen auf einen zu erwartenden „Lock-in-Effekt“: eine Situation, in der bestehende Technik nicht mehr erneuert wird, da die dahinterstehende Infrastruktur zu teuer ist. Sie argumentieren, dass die umfangreichen und komplexen Infrastruktursysteme in Bereichen wie Transport Innovationen verhindern, weshalb dort auch keine vergleichbaren Entwicklungen wie in der Rechentechnik zu verzeichnen seien.³³

Der Lock-in-Effekt ist jedoch nicht das entscheidende Hindernis bei der Erneuerung von Transportsystemen. Wenn komplexe Infrastruktur tatsächlich einen Lock-in-Effekt verursacht, warum dann nicht auch im Falle des Internets? Schließlich erfordert auch das Internet umfangreiche und komplexe Infrastruktur. Das Wachstum von Informationsverarbeitung und -übertragung hat allerdings dazu beigetragen, dass andere Bereiche ein Plateau erreicht haben (das heißt, am oberen Ende einer S-Kurve stagnieren), da viele, wenn nicht alle Bedürfnisse in diesen Bereichen durch die exponentiell wachsenden Kommunikationstechniken abgedeckt werden konnten. Mein eigenes Unternehmen beispielsweise hat Mitarbeiter in verschiedenen Teilen des Landes, und viele Dinge, die früher die Beförderung einer Person oder eines Pakets erforderlich gemacht hätten, können heute immer besser durch virtuelle Treffen erledigt werden – möglich wird dies durch eine reiche Palette an Kommunikationstechniken, an deren Entwicklung Lanier selbst beteiligt ist. Weiterentwicklungen des Transportwesens werden sich vor allem durch die in **Kapitel 5** besprochene Nanotechnik-basierte Energietechnik ergeben. Doch mit der Entstehung immer realistischerer, hochauflösenderer und umfassenderer Formen virtueller Realität werden unsere Zusammenkünfte immer mehr von Computer- und Kommunikationstechnik bestimmt sein.

Wie in **Kapitel 5** besprochen wird molekulare Nanofertigung das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs auch auf Bereiche wie Energie und Transport übertragen. Sobald wir praktisch jedes physische Produkt aus Informationen und kostengünstigen Rohstoffen herstellen können, werden diese traditionell schwerfälligen Industriezweige dieselbe jährliche Verdopplung von Preis-Leistung und Kapazität erfahren wie die Informationstechnik. Energie und Transport werden dann zur Informationstechnik gehören.

Wir werden den Vormarsch von nanotechnischen Solarkollektoren erleben, die leicht, effizient und günstig sind, sowie von ähnlich leistungsstarken Brennstoffzellen und anderen Techniken zur Speicherung und Verteilung von Energie. Strom aus nanogefertigten Solarzellen und anderen erneuerbaren Quellen, gespeichert in nanogefertigten Brennstoffzellen, wird eine saubere und günstige Energiequelle für Transport jeglicher Art darstellen. Zudem werden wir in der Lage sein, Geräte – einschließlich von Flugapparaten verschiedener Größe – nahezu kostenlos herzustellen, abgesehen von den Kosten des Bauplans (die nur einmalig ausgegeben werden müssen). Es wird daher möglich sein, kleine, günstige Fluggeräte zu produzieren, die Pakete innerhalb von Stunden direkt an den Zielort verfrachten, ganz ohne den Umweg über Transportfirmen. Größere, aber immer noch günstige Fluggeräte mit nanogefertigten Mikroflügeln werden Menschen von Ort zu Ort befördern.

Informationstechnik hat bereits großen Einfluss in allen Industriezweigen. Wenn in einigen Jahrzehnten die GNR-Techniken voll ausgereift sind, wird jeder Bereich menschlichen Schaffens und Strebens von Informationstechnik bestimmt sein und somit direkt vom Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs profitieren.

Ontologie-Kritik: Kann ein Computer bewusst sein?

Da wir das Gehirn nicht besonders gut verstehen, sind wir stets versucht, die neueste Technik als Modell dafür heranzuziehen. In meiner Kindheit wurde uns immer versichert, das Gehirn sei eine Telefonzentrale^{*}. („Was sonst könnte es sein?“) Ich fand es amüsant, dass Sherrington, der große britische Neurowissenschaftler, dachte, das Gehirn funktioniere wie ein Telegrafennetz.

Freud verglich das Gehirn mit hydraulischen und elektromagnetischen Systemen. Leibniz verglich es mit einer Mühle, und ich habe gehört manche der alten Griechen dachten, das Gehirn funktioniere wie ein Katapult. Heute ist die Metapher selbstverständlich der Digitalcomputer.

JOHN R. SEARLE, „MINDS, BRAINS, AND SCIENCE“

Kann ein Computer – eine nichtbiologische Intelligenz – bewusst sein? Zuerst müssen wir uns natürlich einigen, was diese Frage überhaupt bedeutet. Wie zuvor besprochen gibt es über manche Dinge, die zunächst einfach erscheinen, sehr widersprüchliche Ansichten. Wie auch immer wir jedoch den Begriff Bewusstsein definieren – er gilt auf alle Fälle weithin als entscheidendes Merkmal der Menschlichkeit.³⁴

John Searle, ein außergewöhnlicher Philosoph (University of California in Berkeley), ist unter seinen Anhänger bekannt für seine vermeintlich zähe Verteidigung der Mysterien des menschlichen Bewusstseins gegen die Trivialisierung durch „reduktionistische“ Verfechter starker KI wie Ray Kurzweil. Und obwohl mir die Logik in Searles berühmtem Gedankenexperiment mit dem „Chinesischen Zimmer“ stets tautologisch erschien, erwartete ich von Searle eine Abhandlung, welche die Paradoxien des Bewusstseins herausstellt. Dementsprechend überrascht war ich, von Searle Aussagen wie die folgenden zu lesen:

„menschliche Gehirne erzeugen Bewusstsein durch eine Reihe spezifischer neurobiologischer Abläufe im Gehirn“;

„Der entscheidende Punkt ist, sich zu vergegenwärtigen, dass Bewusstsein ein biologischer Prozess ist, so wie Verdauung, Laktation, Photosynthese und Mitose“;

„Das Gehirn ist eine Maschine, eine biologische Maschine natürlich, aber dennoch eine Maschine. Der erste Schritt ist daher, herauszufinden, wie das Gehirn vorgeht, und dann eine künstliche Maschine zu bauen, die über gleichermaßen effektive Mechanismen zur Erzeugung von Bewusstsein verfügt“; und

„Wir wissen, dass Gehirne Bewusstsein durch spezifische biologische Mechanismen erzeugen.“³⁵

Wer ist hier also der Reduktionist? Searle scheint zu erwarten, dass wir die Subjektivität eines anderen Wesens genauso messen können wie die Sauerstoffproduktion der Fotosynthese.

Searle schreibt, dass ich „häufig IBMs Deep Blue als Beweis für die überlegene Intelligenz von Computern“ heranziehe. Doch das Gegenteil ist der Fall: Ich erwähne Deep Blue nicht, um auf seinen Schacherfolgen herumzureiten, sondern um die Unterschiede zwischen der menschlichen Herangehensweise an das Spiel und derzeitigen maschinellen Ansätzen zu veranschaulichen. Wie zuvor besprochen verbessern sich jedoch die Mustererkennungsfähigkeiten von Schachprogrammen. Maschinen beginnen also, die analytischen Fähigkeiten traditioneller Computerintelligenz mit menschlicher Mustererkennung zu kombinieren. Das menschliche Paradigma (der selbstorganisierenden chaotischen Prozesse) hat grundlegende Vorteile: Wir können extrem feinsinnige Muster erkennen und darauf reagieren. Doch wir können diese Fähigkeit auch Maschinen verleihen. Genau hierin liegt mein persönliches Forschungsinteresse.

Searle ist vor allem für seine Analogie des Chinesischen Zimmers bekannt, die er in den letzten zwanzig Jahren in unterschiedlichen Formulierungen präsentierte. Eine der vollständigeren Definitionen findet sich in seinem Buch *The Rediscovery of the Mind* (1992):

Ich glaube, das bekannteste Argument gegen starke KI war mein Chinesisches Zimmer [...], welches zeigte, dass ein System durch Ausführung eines Programms eine menschliche kognitive Fähigkeit, beispielsweise die Beherrschung des Chinesischen, perfekt simulieren kann, obwohl es über keinerlei Verständnis des Chinesischen verfügt. Man stelle sich einfach vor, dass jemand, der keinerlei Chinesisch versteht, eingeschlossen ist in einem Zimmer mit einem Haufen chinesischer Schriftzeichen und einem Computerprogramm zur Beantwortung von Fragen auf Chinesisch. Der Input des Systems besteht in chinesischen Symbolen, die eine Frage darstellen; der Output besteht in chinesischen Symbolen, welche die Antwort darstellen. Wir wollen annehmen, dass das Programm so gut ist, dass die Antworten auf die Fragen nicht von denen eines chinesischen Muttersprachlers unterscheidbar sind. Trotzdem kann weder die Person in dem Zimmer, noch irgendein anderer Teil des Systems wirklich Chinesisch; und weil ein programmierter Computer nichts hat, was dieses System nicht hat, versteht ein programmierter Computer auch kein Chinesisch. Weil das Programm rein formal oder syntaktisch ist, und weil ein menschlicher Geist über mentale oder semantische Inhalte verfügt, geht jeder Versuch, Geist durch ein reines Computerprogramm zu erschaffen, an den entscheidenden Merkmalen unseres Geistes vorbei.³⁶

Searles Beschreibung zeugt von einer Verkennung des eigentlichen Wesens von Gehirnprozessen oder der nichtbiologischen Prozesse, welche Gehirnprozesse reproduzieren könnten. Searle beginnt mit der Annahme, dass der „Mensch“ in dem Zimmer nichts versteht, weil er „nur wie ein Computer“ handelt – und offenbart damit bereits seine Voreingenommenheit. Searle kommt dann zu dem wenig überraschenden Schluss, dass ein (durch den Menschen in dem Zimmer verkörperter) Computer nichts versteht. Searle kombiniert diese Tautologie mit einem grundsätzlichen Widerspruch: Der Computer kann kein Chinesisch und ist (laut Searle) dennoch in der Lage einwandfrei auf Chinesisch Fragen zu beantworten. Doch wenn ein Wesen – biologisch oder nicht – der menschlichen Sprache tatsächlich nicht mächtig ist, wird es von einem kompetenten Fragesteller schnell entlarvt werden. Außerdem müsste das Programm so komplex sein wie das menschliche Gehirn, um überzeugende Antworten liefern zu können. Der Fragesteller wäre längst gestorben, während der Mann in dem Zimmer Millionen von Jahre damit verbrächte, ein viele Millionen Seiten langes Programm auszuführen.

Vor allen Dingen dient dieser Mann nur als Zentralprozessor und ist somit nur ein kleiner Teil des Systems. Auch wenn er es nicht erkennen kann, ist das Verständnis verteilt über das gesamte Programmmuster und die Milliarden von Notizen, die er anfertigen müsste, um das Programm auszuführen. *Ich kann Englisch, obwohl keine meiner Gehirnzellen Englisch kann.* Mein Sprachverständnis steckt in den weitläufigen Mustern von Neurotransmitterstärken, synaptischen Spalten und neuronalen Verknüpfungen. Searle verkennet die Bedeutung von verteilten Informationsmustern und ihren emergenten Eigenschaften.

Hinter der meisten Kritik an den Möglichkeiten intelligenter Maschinen, die wir von Searle und anderen grundsätzlich materialistisch eingestellten Philosophen zu hören bekommen, steht die Verkennung der Tatsache, dass Computerprozesse genau wie das menschliche Gehirn chaotisch, unvorhersehbar, durcheinander, spielerisch und emergent sein können. Searle landet damit unweigerlich bei einer Kritik von „Symbolverarbeitung“: dass aus geordneten, sequenziellen, symbolverarbeitenden Prozessen kein wahres Denken hervorgehen kann.

Das halte ich (je nachdem, auf welcher Ebene wir einen intelligenten Prozess modellieren) für richtig – doch Symbolverarbeitung (in Searles Sinne) ist nicht die einzige Betriebsart von Maschinen oder Computern.

Sogenannte Computer (der Begriff „Computer“ im Sinne von „Rechner“ ist ebenfalls problematisch, da Maschinen mehr können als „berechnen“) sind nicht auf Symbolverarbeitung beschränkt. Auch nichtbiologische Wesen können sich das emergente, selbstorganisierende Paradigma zunutze machen – eine Entwicklung, die längst begonnen hat und in den nächsten Jahrzehnten eine sehr wichtige Rolle spielen wird. Computer müssen nicht mit Nullen und Einsen arbeiten und sie müssen auch nicht digital sein. Und selbst wenn sie digital sind: Digitale Algorithmen können analoge Prozesse mit beliebiger Genauigkeit (oder Ungenauigkeit) simulieren. Maschinen können massiv parallel arbeiten. Und Maschinen können chaotische, emergente Methoden nutzen – genau so, wie das Gehirn es tut.

Die wichtigsten Methoden der computergestützten Mustererkennung beruhen nicht auf Symbolverarbeitung, sondern auf selbstorganisierenden Verfahren, wie ich sie in **Kapitel 5** beschrieben habe (neuronale Netze, Markovmodelle, Genetische Algorithmen und komplexere Paradigmen, die auf dem Reverse Engineering des Gehirns beruhen). Eine Maschine, die wirklich die Funktion von Searles Chinesischem Zimmer erfüllen könnte, würde nicht einfach sprachliche Symbole verarbeiten, da dieser Ansatz nicht funktioniert. Dies ist der philosophische Taschentrick, auf dem das Chinesische Zimmer beruht. Berechnungen sind nicht auf die Manipulation logischer Symbole beschränkt. Im menschlichen Gehirn geht etwas anderes vor sich, und nichts hält uns davon ab, diese biologischen Prozesse zu ergründen und in nichtbiologischen Entitäten zu reproduzieren.

Anhänger von Searles Argumentation scheinen zu glauben, dass das Chinesische Zimmer zeigt, dass Maschinen (das heißt nichtbiologische Entitäten) niemals ein ernsthaftes Verständnis beispielsweise des Chinesischen entwickeln können. Zunächst einmal muss man sich klar machen, dass ein solches System – die Person und der Computer in dem Zimmer –, um, wie Searle es ausdrückt, „eine menschliche kognitive Fähigkeit, beispielsweise die Beherrschung des Chinesischen, perfekt simulieren“ zu können und überzeugend Fragen auf Chinesisch zu

beantworten, gewissermaßen einen chinesischen Turing-Test bestehen muss. Wir sprechen schließlich nicht von der Beantwortung einer vorher feststehenden Auswahl von Fragen (was eine sehr simple Aufgabe wäre), sondern von den unerwarteten Fragen oder Frageserien eines kompetenten menschlichen Fragestellers.

Die Person im Inneren des Chinesischen Zimmers hat wenig bis gar keine Bedeutung. Sie gibt nur Dinge in den Computer ein und überträgt mechanisch das Ergebnis (oder befolgt alternativ nur die Regeln des Programms). Weder der Computer noch der Mensch müssen in einem Zimmer sein. Searles Beschreibung so zu interpretieren, dass der Mensch selbst das Programm ausführt, ändert nichts, außer das System sehr langsam (bei Weitem nicht echtzeitfähig) und extrem fehleranfällig zu machen. *Sowohl der Mensch als auch das Zimmer sind irrelevant.* Von Bedeutung ist allein der Computer (entweder das elektronische Gerät oder der Computer in Form einer Person, die ein Programm befolgt).

Um das menschliche Sprachverständnis tatsächlich „perfekt simulieren“ zu können, müsste der Computer über ein ebensolches Verständnis verfügen. Der Prämisse zufolge ist er „in der Lage Chinesisch zu verstehen“. Somit ist es widersprüchlich, anschließend zu behaupten, dass „ein programmierter Computer“ kein Chinesisch versteht.

Computer und Programme, *wie wir sie heute kennen*, können die beschriebene Aufgabe nicht erfüllen. Wenn wir das Chinesische Zimmer als einen Computer von heute verstehen, so ist die Prämisse nicht erfüllbar. Sie wäre es nur, wenn der Computer die Tiefe und Komplexität eines Menschen besitzen würde. Turing hatte erkannt, dass die volle menschliche Intelligenz notwendig ist, um eine Reihe von Fragen eines menschlichen Gegenübers überzeugend zu beantworten. Ein hierzu fähiger Computer – wie es ihn in einigen Jahrzehnten geben wird – wird so komplex wie ein Mensch (oder komplexer) sein und über ein profundes Sprachverständnis verfügen, denn andernfalls könnte er einen Menschen nicht davon überzeugen.

Einfach zu behaupten, dass der Computer „nicht wirklich Chinesisch kann“, macht keinen Sinn, da es der Prämisse des ganzen Vergleichs widerspricht. Auch die Behauptung, der Computer hätte kein Bewusstsein, ist kein überzeugendes Argument. Um im Einklang mit Searles anderen

Aussagen zu stehen müssen wir schließen, dass wir nicht wissen, ob der Computer bewusst ist oder nicht. In Hinblick auf relativ einfache Maschinen wie heutige Computer lässt sich sagen, dass ihr Verhalten nicht auf Bewusstsein hindeutet, auch wenn wir nie ganz sicher sein können. Das wird jedoch nicht für einen Computer gelten, der die Anforderungen des Chinesischen Zimmers erfüllt. Eine solche Maschine wird *zumindest den Anschein erwecken*, sie habe ein Bewusstsein, auch wenn wir wiederum nicht sicher sein können. Einfach zu behaupten, es sei offensichtlich, dass der Computer (oder das gesamte System, bestehend aus Zimmer und Person) kein Bewusstsein hat, ist bei Weitem kein überzeugendes Argument.

In obenstehendem Zitat beschreibt Searle das Programm als „rein formal oder syntaktisch“. Doch wie zuvor beschrieben ist das eine irreführende Annahme, die von Searles Verkenntung der technischen Anforderungen für ein solches System zeugt. Auf dieser Annahme basiert Searles KI-Kritik. Ein rein formales oder syntaktisches Programm kann kein Chinesisch verstehen und wird niemals „eine menschliche kognitive Fähigkeit [...] perfekt simulieren“.

Doch wie gesagt müssen unsere Maschinen nicht so aufgebaut sein. Wir können sie genauso gestalten wie die Natur das menschliche Gehirn: mit stark parallelisierten chaotischen, emergenten Methoden. Außerdem gibt es keinen zwingenden Grund, weshalb Maschinen grundsätzlich auf Syntax beschränkt sein sollten und keine Semantik beherrschen können. Hätte die Maschine in Searles Chinesischem Zimmer kein semantisches Verständnis, so könnte sie keine überzeugenden Antworten geben – was ein Widerspruch zu Searles eigener Prämisse wäre.

In **Kapitel 4** habe ich das fortschreitende Reverse Engineering des menschlichen Gehirns besprochen sowie die Übertragung der dabei entdeckten Methoden auf ausreichend leistungsfähige Rechenplattformen. Wenn wir also einem Computer genau wie einem Menschen Chinesisch beibringen, so versteht er auch Chinesisch. Dies mag banal klingen, doch gerade hier widerspricht Searle. Ich spreche nicht von einer Simulation im eigentlichen Sinne, sondern, um mich Searles Terminologie zu bedienen, von der Duplikation der Kausalkräfte des massiven Neuronenverbands, den

wir Gehirn nennen – beziehungsweise zumindest jener Kausalkräfte, die für unser Denken von Bedeutung sind.

Wird eine solche Kopie ein Bewusstsein haben? Ich denke nicht, dass das Chinesische Zimmer uns bei dieser Frage weiterhelfen kann.

Es ist wichtig, sich klar zu machen, dass sich der Vergleich des Chinesischen Zimmers auch auf das Gehirn anwenden lässt. Obwohl das wohl kaum in Searles Sinne ist, zeigt seine Argumentation, dass das menschliche Gehirn selbst zu keinem echten Verständnis fähig ist. Searle schreibt: „Der Computer [...] manipuliert erfolgreich formale Symbole. Die Symbole für sich genommen sind völlig bedeutungslos: Sie haben nur die Bedeutung, die wir damit verknüpfen. Der Computer weiß von all dem nichts, er schiebt lediglich jene Symbole umher.“ Searle erkennt an, dass biologische Neuronen Maschinen sind. Wenn wir also „der Computer“ durch „das menschliche Gehirn“ ersetzen und „formale Symbole“ durch „Neurotransmitterkonzentrationen und ähnliche Mechanismen“, so erhalten wir:

[Das menschliche Gehirn] [...] manipuliert erfolgreich [Neurotransmitterkonzentrationen und ähnliche Mechanismen]. Die [Neurotransmitterkonzentrationen und ähnlichen Mechanismen] für sich genommen sind völlig bedeutungslos: Sie haben nur die Bedeutung, die wir damit verknüpfen. [Das menschliche Gehirn] weiß von all dem nichts, [es] schiebt lediglich jene [Neurotransmitterkonzentrationen und ähnliche Mechanismen] umher.

Natürlich haben Neurotransmitterkonzentrationen und andere neuronale Details (zum Beispiel neuronale Verknüpfungen und Neurotransmittermuster) an sich keine Bedeutung. Die Bedeutung und das Verständnis, die im menschlichen Gehirn entstehen, sind *emergente* Eigenschaften seiner komplexen Aktivierungsmuster. Dasselbe gilt für Maschinen. Obwohl das „Umherschieben von Symbolen“ an sich keine Bedeutung hat, entstehen in nichtbiologischen Systemen dieselben emergenten Muster wie in biologischen Systemen (zum Beispiel dem Gehirn). Hans Moravec schreibt: „Searle sucht nach Verständnis an den falschen Orten. [...] [Er] kann scheinbar nicht akzeptieren, dass echte Bedeutung in bloßen Mustern existieren kann.“³⁷

Nun wollen wir die zweite Version des Chinesischen Zimmers betrachten. In dieser enthält das Zimmer nicht einen Computer oder einen

Menschen, sondern eine ganze Reihe von Leuten, die mit Papierzetteln mit chinesischen Schriftzeichen hantieren – der Computer wird also von dieser Menschengruppe simuliert. Dieses System würde überzeugend auf chinesische Fragen antworten, obwohl keine der beteiligten Personen Chinesisch kann. Auch können wir nicht behaupten, dass das Gesamtsystem Chinesisch kann, zumindest nicht bewusst. Damit zieht Searle die Idee, das System sei bewusst, ins Lächerliche: Was soll daran schon bewusst sein? Das Papier? Oder das Zimmer?

Eines der Probleme mit dieser Version des Chinesischen Zimmers ist, dass das Zimmer seiner Aufgabe, chinesische Fragen zu beantworten, nicht einmal annähernd gerecht werden könnte. Es ist vielmehr eine Beschreibung eines statischen Maschinenprozesses, ähnlich einer Übersetzungstabelle, mit möglicherweise einigen logischen Operationen. Das Zimmer wäre vielleicht in der Lage, eine beschränkte Anzahl von Fragen mechanisch zu beantworten. Um jedoch auf *jede* beliebige Frage antworten zu können, müsste es genauso gut Chinesisch können wie ein chinesischsprachiger Mensch. Es müsste, wie schon gesagt, praktisch einen chinesischen Turing-Test bestehen, und dazu müsste es genauso clever und komplex sein wie das menschliche Gehirn. Mit statischen, tabellenartigen Algorithmen ist das nicht zu schaffen.

Wenn wir tatsächlich ein des Chinesischen mächtiges Gehirn nachbilden wollten, indem wir Menschen als Zahnrädchen einer großen Maschine einsetzen, so bräuchten wir dafür Milliarden von Menschen, welche die Abläufe in einem menschlichen Gehirn simulieren. (Genau genommen würden diese Menschen einen Computer simulieren, der ein Gehirn simuliert). Wir bräuchten also ein ziemlich großes Zimmer, und das resultierende System wäre, selbst bei maximaler Effizienz, viele Tausend Male langsamer als das Gehirn, das es simuliert.

Nun stimmt es natürlich, dass keiner der Milliarden von Menschen Chinesisch können müsste – und keiner von ihnen würde das System verstehen. Doch dasselbe gilt für die neuronalen Verknüpfungen eines echten menschlichen Gehirns. Keine der Billionen von Verknüpfungen in meinem Gehirn weiß von dem Buch, das ich schreibe, keine davon kann Englisch oder weiß irgendetwas von den Dingen, die ich weiß. Keine davon

ist sich dieses Kapitels bewusst, oder irgendeines der anderen Dinge, derer ich mir bewusst bin. Vermutlich hat keine von ihnen auch nur das geringste Bewusstsein. Doch das Gesamtsystem – Ray Kurzweil – hat ein Bewusstsein. Zumindest behaupte ich, bewusst zu sein (und bisher hat noch niemand daran gezweifelt).

Wenn wir Searles Chinesischem „Zimmer“ also den nötigen Umfang zugestehen, wie können wir dann wissen, dass das komplette System mit Milliarden von Menschen, die ein chinesischesprachiges Gehirn simulieren, kein Bewusstsein hat? Sicher könnte man sagen, dass ein solches System Chinesisch kann. Und dagegen, dass es ein Bewusstsein hat, spräche genauso viel oder genauso wenig, wie dagegen, dass andere Gehirnprozesse bewusst sind. Wir können die subjektive Erfahrung eines anderen Wesens nicht messen (und zumindest in manchen seiner Schriften scheint Searle dies anzuerkennen), und das Multimillionen-Menschen-„Zimmer“ wäre ein solches Wesen. Vielleicht hätte es ein Bewusstsein. Searle behauptet schlichtweg ipso facto, dass es kein Bewusstsein hat, und dass diese Tatsache offensichtlich ist. Der Anschein mag entstehen, wenn man von einem normalen Zimmer spricht, mit einer überschaubaren Anzahl von Menschen darin, die eine kleine Menge von Papierzetteln herumbewegen. Doch ein solches System wäre wie gesagt nicht einmal annäherungsweise funktionsfähig.

Es gibt einen weiteren verwirrenden Aspekt des Chinesischen Zimmers, der direkt mit der Komplexität und Größe des Systems zusammenhängt. Searle schreibt, während er zwar nicht beweisen könne, dass seine Schreibmaschine oder sein Kassettenrekorder kein Bewusstsein haben, erscheine es ihm als offensichtlich, dass dem so ist. Warum ist das offensichtlich? Nun, einer der Gründe ist, dass Schreibmaschinen und Kassettenrekorder relativ simple Gegenstände sind.

Der Fall liegt jedoch weniger klar bei einem System, das so komplex wie das menschliche Gehirn ist – oder gar eine Kopie des Aufbaus und der „Kausalkräfte“ eines echten Gehirns darstellt. Wenn ein solches „System“ sich wie ein Mensch verhält und wie ein Mensch Chinesisch spricht – hat es dann ein Bewusstsein? Die Antwort ist nun nicht mehr so offensichtlich. Das Argument des Chinesischen Zimmers besteht darin, eine simple

„Maschine“ zu beschreiben und darauf zu verweisen, wie absurd es wäre, dieser simplen Maschine ein Bewusstsein beizumessen. Entscheidend für diesen Trugschluss sind Größe und Komplexität des Systems. Komplexität allein ist keine hinreichende Bedingung für Bewusstsein, doch das Chinesische Zimmer sagt uns rein gar nichts darüber, ob ein solches System bewusst ist oder nicht.

Kurzweils Chinesisches Zimmer. Ich habe meine eigene Variante des Chinesischen Zimmers – ich nenne sie Ray Kurzweils Chinesisches Zimmer.

In meinem Gedankenexperiment befindet sich ein Mensch in einem Zimmer. Das Zimmer ist im Stil der Ming Dynastie dekoriert und enthält ein Podest mit einer Schreibmaschine. Auf den Tasten der Schreibmaschine finden sich chinesische Symbole anstatt englischer Buchstaben. Außerdem wurde die Mechanik der Schreibmaschine geschickt manipuliert: Wenn der Mensch eine chinesische Frage eintippt, so schreibt die Maschine nicht die Frage, sondern die Antwort darauf. Der Mensch erhält nun Fragen in chinesischer Schrift und drückt pflichtbewusst die entsprechenden Tasten. Die Maschine schreibt nicht die Frage, sondern die Antwort. Der Mensch gibt dann die Antwort nach außen weiter.

Wir haben also ein Zimmer mit einem Menschen darin, der von außen betrachtet Chinesisch zu können scheint, die Sprache jedoch in Wirklichkeit nicht beherrscht. Die Schreibmaschine kann eindeutig auch kein Chinesisch: Es handelt sich um eine gewöhnliche Schreibmaschine mit veränderter Mechanik. Der Mensch in dem Zimmer kann Fragen auf Chinesisch beantworten, doch wer oder was beherrscht hier wirklich die Sprache? Die Dekoration?

Nun gibt es vermutlich Einwände gegen mein Chinesisches Zimmer.

Man könnte einwenden, dass die Dekoration scheinbar irrelevant ist.

Ja, das stimmt. Genau wie das Podest – und dasselbe ließe sich über den Menschen und das Zimmer sagen.

Man könnte zudem einwenden, dass die Prämisse absurd ist. Eine einfache Schreibmaschine kann unmöglich durch mechanische Veränderungen dazu gebracht werden, überzeugend chinesische Fragen zu

beantworten. (Ganz zu schweigen von der Tatsache, dass die Tausenden von verschiedenen Schriftzeichen des Chinesischen niemals auf den Tasten einer Schreibmaschine Platz fänden).

Ja, auch das ist ein gültiger Einwand. Der einzige Unterschied meiner Variation des Chinesischen Zimmers zu Searles Formulierung besteht darin, dass die Absurdität und Unmöglichkeit meiner Version völlig offenkundig ist. Searles Chinesisches Zimmer mag manchen Lesern oder Hörern weniger absurd erscheinen – das ist es jedoch nicht.

Doch genau wie Searles Zimmer können wir auch meine Variante funktionstüchtig machen: Wir müssen lediglich der Schreibmaschine die Komplexität des menschlichen Gehirns verleihen. Theoretisch ist das möglich (wenn auch nicht praktisch). Doch die Bezeichnung „Mechanik der Schreibmaschine“ deutet nicht auf eine solche Komplexität hin. Dasselbe gilt für Searles Beschreibung eine Person, die mit Papierzetteln hantiert, oder ein Buch voller Regeln oder ein Computerprogramm befolgt – diese Beschreibungen sind gleichermaßen irreführend.

Searle schreibt, „echte menschliche Gehirne erzeugen Bewusstsein durch eine Reihe spezifischer neurobiologischer Abläufe im Gehirn.“ Die Begründung dieser überraschenden Erkenntnis bleibt er uns jedoch schuldig. Um Searles Standpunkt zu verdeutlichen, zitiere ich aus einem Brief, den er mir geschickt hat:

Es könnte sich herausstellen, dass recht simple Organismen wie Termiten oder Schnecken ein Bewusstsein haben. [...] Der entscheidende Punkt ist, sich zu vergegenwärtigen, dass Bewusstsein ein biologischer Prozess ist, so wie Verdauung, Laktation, Photosynthese oder Mitose, und das man nach seiner biologischen Erklärung suchen sollte, wie man auch biologische Erklärungen für diese anderen Prozesse sucht.³⁸

Ich antwortete:

Ja, es stimmt, dass Bewusstsein emergent aus dem/den biologischen Prozess(en) von Gehirn und Körper hervorgeht, doch es gibt zumindest einen Unterschied. Wenn ich frage: „Produziert ein bestimmtes Wesen Kohlenstoffdioxid?“, so lässt sich diese Frage durch eine objektive Messung eindeutig beantworten. Wenn ich frage: „Ist dieses Wesen bewusst?“, so könnte ich zwar Argumente anführen – möglicherweise gute und überzeugende Argumente –, jedoch keine eindeutige, objektive Messung anstellen.

In Bezug auf die Schnecke schrieb ich:

Wenn Sie nun schreiben, dass eine Schnecke ein Bewusstsein haben könnte, so bedeutet das, wie ich glaube, dass es sein könnte, dass wir eine gewisse neurophysiologische Ursache des Bewusstseins (nennen wir sie „x“) entdecken können, das heißt, dass Menschen bewusst sind, wenn diese Ursache vorliegt, und nicht bewusst sind, wenn sie fehlt. Wir hätten also mutmaßlich eine objektiv messbare Ursache für Bewusstsein. Wenn wir diese in einer Schnecke vorfänden, so würden wir daraus schließen, dass auch die Schnecke ein Bewusstsein hat. Diese Schlussfolgerung wäre jedoch nur eine starke Vermutung und kein Beweis für die subjektive Erfahrung einer Schnecke. Es könnte sein, dass Menschen bewusst sind aufgrund von „x“ sowie aufgrund einer zusätzlichen Eigenschaft „y“, die allen Menschen gemein ist. Diese Eigenschaft „y“ könnte mit der Komplexitätsebene des Menschen oder seinem Aufbau zu tun haben, oder mit den quantenmechanischen Eigenschaften unserer Mikrotubuli (obwohl dies auch Teil von „x“ sein könnte), oder mit etwas völlig anderem. Die Schnecke hätte „x“ aber nicht „y“ – und somit kein Bewusstsein.

Wie lässt sich diese Debatte entscheiden? Die Schnecke können wir leider nicht fragen. Selbst wenn wir sie irgendwie fragen könnten, ob sie ein Bewusstsein hat, und sie ja sagen würde, so wäre damit gar nichts bewiesen. Ihr recht einfaches und berechenbares Verhalten hilft uns auch nicht weiter. Das Vorhandensein von „x“ bei der Schnecke wäre ein gutes Argument und würde wohl viele Leute überzeugen. Doch es wäre immer noch nur ein Argument – keine objektive Messung der subjektiven Erfahrung der Schnecke. Es liegt, wie wir wissen, im Wesen subjektiver Erfahrungen, dass sie nicht objektiv messbar sind.

Es gibt heutzutage viele solcher Debatten – zumeist jedoch nicht über Schnecken, sondern über höhere Tierarten. Für mich sind Hunde und Katzen allem Anschein nach bewusste Wesen (eine Meinung, die auch Searle teilt). Doch nicht alle Menschen stimmen dem zu. Die Behauptung ließe sich sicherlich durch das Aufzeigen von Gemeinsamkeiten zwischen diesen Tieren und uns Menschen untermauern, doch all das wären nur Argumente und kein wissenschaftlicher Beweis.

Searle rechnet mit der Entdeckung einer eindeutigen biologischen „Ursache“ des Bewusstseins und scheint nicht einsehen zu können, dass Verständnis oder Bewusstsein emergent aus der Gesamtheit der Aktivierungsmuster entstehen kann. Andere Philosophen, zum Beispiel Daniel Dennett, haben entsprechende „Muster-emergente“ Bewusstseinstheorien formuliert. Aber unabhängig davon, ob das Bewusstsein durch spezifische biologische Prozesse oder durch ein Aktivierungsmuster „verursacht“ wird, sagt Searle nicht, auf welcher

Grundlage Bewusstsein gemessen oder festgestellt werden könnte. Wenn wir bei Menschen neuronale Korrelate von Bewusstsein finden, so bedeutet das nicht, dass das Vorliegen oder die Abwesenheit derselben Korrelate bei Schnecken etwas über deren Bewusstheit aussagt – solche Argumente lassen sich nicht durch direkte Messungen belegen. Darin unterscheidet sich Bewusstsein von objektiv messbaren Vorgängen wie Laktation oder Fotosynthese.

Wie in **Kapitel 4** besprochen haben wir ein biologisches Merkmal entdeckt, das nur bei Menschen und einigen anderen Primaten vorkommt: Spindelneuronen. Diese tief verzweigten Zellen scheinen eine wichtige Rolle für unser bewusstes Verhalten zu spielen, insbesondere für emotionale Reaktionen. Ist das Spindelneuron die physiologische Ursache „x“ für das menschliche Bewusstsein?

Searle schreibt: „Aus rein neurobiologischen Gründen steht es außer Frage, dass der Stuhl oder der Computer bewusst ist.“ Ich stimme zu, dass Stühle nicht bewusst zu sein scheinen, doch für Computer der Zukunft, die über dieselbe Komplexität, Tiefe, Feinsinnigkeit und über dieselben Fähigkeiten verfügen wie Menschen, lässt sich Bewusstsein, so denke ich, nicht ausschließen. Searle nimmt einfach an, dass sie keines haben, und dass die gegenteilige Annahme „außer Frage“ steht. Searles Argumente haben tatsächlich nicht mehr Substanz als diese Tautologie.

Searles Ausschluss der Möglichkeit, dass Computer ein Bewusstsein haben können, klingt unter anderem deshalb so überzeugend, weil die Computer von heute keinen sehr bewussten Eindruck machen. Ihr Verhalten ist – wenn auch manchmal unberechenbar – zumeist spröde und formelhaft. Doch wie zuvor beschrieben sind Computer heute etwa eine Million Mal einfacher als das menschliche Gehirn, was einer der Gründe ist, weshalb sie nicht über die Vorzüge des menschlichen Denkens verfügen. Doch diese Disparität nimmt schnell ab und wird sich in einigen Jahrzehnten umkehren. Die Maschinen des frühen einundzwanzigsten Jahrhunderts, von denen in diesem Buch die Rede ist, werden sich in Aussehen und Verhalten deutlich von den relativ einfachen heutigen Computern unterscheiden.

Searle vertritt die Ansicht, dass nichtbiologische Entitäten lediglich logische Symbole manipulieren können – anderen Paradigmen scheint er

sich nicht bewusst zu sein. Es ist richtig, dass regelbasierte Expertensysteme und Spiele-KIs weitgehend auf Symbolverarbeitung beruhen. Doch der derzeitige Trend geht in eine andere Richtung, hin zu selbstorganisierenden, chaotischen Systemen, die biologisch inspirierte Methoden einsetzen, einschließlich derjenigen Prozesse, die direkt aus dem Reverse Engineering jener Hunderten von Neuronenverbänden stammen, die wir kollektiv als das menschliche Gehirn bezeichnen.

Searle erkennt an, dass biologische Neuronen Maschinen sind, und auch, dass das ganze Gehirn eine Maschine ist. Wie in **Kapitel 4** besprochen haben wir die „Kausalkräfte“ einzelner Neuronen sowie beträchtlicher Neuronenverbände bereits extrem detailliert nachgebildet. Es gibt prinzipiell nichts, was uns abhält, diese Bestrebungen auf das komplette menschliche Gehirn auszuweiten.

Die Schere zwischen Arm und Reich

Lanier und andere haben Bedenken geäußert über die „erschreckende“ Aussicht, dass die Technik der Zukunft den Reichen gewisse Vorteile und Möglichkeiten eröffnet, die dem Rest der Menschheit verwehrt bleiben.³⁹ Eine solche Ungleichheit wäre natürlich nichts Neues, doch gerade hierauf hat das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs einen wichtigen und vorteilhaften Effekt: Aufgrund des fortwährenden exponentiellen Preis-Leistungs-Wachstums wird jede Technik so günstig, dass sie bald praktisch kostenfrei verfügbar ist.

Ein Beispiel ist die gigantische Menge hochwertiger und kostenloser Informationen im Internet, die es noch vor wenigen Jahren nicht gab. Nun würde man vielleicht entgegenen, dass nur ein Teil der Weltbevölkerung Zugang zum Netz hat, doch das explosive Wachstum des Internets hat gerade erst begonnen. Selbst in den ärmsten afrikanischen Staaten breitet sich das Internet rasch aus.

Jede Form von Informationstechnik beginnt mit ersten Pionier-Versionen, die nicht sehr gut funktionieren und lediglich für eine kleine Elite erschwinglich sind. Dann wird die Technik etwas besser und ist nur noch

sehr teuer. Dann funktioniert sie gut und ist günstig – und schließlich ist die Technik sehr gut und fast umsonst. Das Handy beispielsweise befindet sich irgendwo zwischen diesen letzten beiden Phasen. Wenn wir noch vor zehn Jahren sahen, wie eine Filmfigur ein tragbares Telefon aus der Tasche zog, so war das ein Zeichen dafür, dass dieser jemand sehr wohlhabend oder mächtig (oder beides) ist. Trotzdem gibt es Regionen auf der Welt, deren Bevölkerung noch vor zwanzig Jahren mehrheitlich Feldbau von Hand betrieb, die aber heute eine informationsbasierte Wirtschaft und eine hohe Mobilfunk-Nutzungsrate haben (zum Beispiel Regionen in Asien, etwa die ländlichen Regionen Chinas). Von den frühen, überkauerten Versionen bis zur kostengünstigen, allgemeinen Verbreitung verstreichen derzeit etwa zehn Jahre. Doch aufgrund der Verdopplung der Paradigmenwechselrate mit jedem Jahrzehnt wird die Verzögerung in zehn Jahren nur noch fünf Jahre betragen. In zwanzig Jahren werden es nur noch zwei bis drei Jahre sein (siehe **Kapitel 2**).

Die Arm-Reich-Disparität bleibt ein kritisches Thema, und zu jedem Zeitpunkt gibt es mehr, was wir dagegen tun können und sollten. Tragisch ist zum Beispiel die mangelhafte Initiative der entwickelten Nationen, wenn es darum geht, afrikanische und andere arme Länder mit AIDS-Medikamenten zu versorgen – was Millionen von Menschen das Leben kostete. Doch die exponentielle Preis-Leistungs-Steigerung der Informationstechnik verringert diese Disparität schnell. Medikamente sind im Grunde eine Informationstechnik und unterliegen derselben jährlichen Preis-Leistungs-Verdopplung wie andere Techniken, beispielsweise Computer, Kommunikation und DNS-Sequenzierung. AIDS-Medikamente wirkten anfänglich nicht sehr gut und kosteten Zehntausende Dollar pro Patient pro Jahr. Heute wirken sie recht gut und kosten in armen Ländern annähernd einhundert Dollar pro Patient pro Jahr.

Der in **Kapitel 2** zitierte Weltbankbericht von 2004 verzeichnet ein höheres Wirtschaftswachstum in den Entwicklungsländern (über 6 Prozent) im Vergleich zum weltweiten Durchschnitt (4 Prozent) und einen allgemeinen Rückgang von Armut (beispielsweise einen Rückgang extremer Armut um 43 Prozent in Ostasien und dem pazifischen Raum seit 1990). Des Weiteren untersuchte der Ökonom Xavier Sala-i-Martin acht

Bemessungsmethoden für globale Ungleichheit zwischen Individuen und stellte fest, dass diese nach allen Maßstäben im letzten Vierteljahrhundert abgenommen hat.⁴⁰

Zu erwartende staatliche Regulationen

Diese Leute reden, als sei die Regierung nicht Teil ihres Lebens. Das hätten sie vielleicht gerne, aber sie ist es nun mal. Sie sollten sich besser darauf einstellen, dass die hier besprochenen Themen, wenn sie aktuell werden, vom ganzen Land debattiert werden. Die Mehrheit der Amerikaner wird nicht einfach stillsitzen und zusehen, wie die Mitglieder einer Elite ihre Persönlichkeiten abstreifen und sich in ihr Cyberspace-Paradies hochladen. Sie werden dabei mitreden wollen. Es wird im ganzen Land heftige Debatten darüber geben.

LEON FUERTH, FRÜHERER NATIONALER SICHERHEITSBERATER VON VIZEPRÄSIDENT AL GORE,
BEI DER FORESIGHT CONFERENCE 2002

Menschliches Leben ohne Tod wäre etwas anderes als menschlich; das Bewusstsein der Sterblichkeit ist die Ursache unserer tiefsten Wünsche und unserer größten Errungenschaften.

LEON KASS, VORSITZENDER DER PRESIDENTIAL COMMISSION ON BIOETHICS, 2003

Manche Kritiker glauben, dass staatliche Regulation den technischen Fortschritt verlangsamen und zum Erliegen bringen wird. Regulation ist zwar von großer Bedeutung, hatte jedoch bisher keinen erkennbaren Einfluss auf die in diesem Buch besprochenen Entwicklungen, welche alle von Regulationen betroffen sind. In Abwesenheit eines totalitären Staates werden wirtschaftliche und andere Kräfte den technischen Fortschritt immer weiter vorantreiben.

Betrachten wir etwa die Stammzellforschung, die sehr umstritten ist und deren Mittel von der US-Regierung eingeschränkt wurden. Stammzellforschung ist nur eine von vielen Ideen zur Steuerung und Beeinflussung biologischer Prozesse, die im Rahmen der biotechnischen Revolution verfolgt werden. Selbst innerhalb des Gebietes der Zelltherapie haben die Kontroversen über die Verwendung embryonaler Stammzellen lediglich für eine Beschleunigung anderer Methoden mit demselben Ziel gesorgt. Transdifferenzierung (die Umwandlung einer Zellart, zum Beispiel

Hautzellen, in eine andere Zellart) hat beispielsweise schnelle Fortschritte gemacht.

Wie in **Kapitel 5** berichtet konnten Forscher unlängst zeigen, dass es möglich ist, Hautzellen in verschiedene andere Zellarten umzuprogrammieren. Darin besteht der Heilige Gral der Zelltherapie, ergibt sich doch hieraus ein unerschöpflicher Vorrat an ausdifferenzierten Zellen mit körpereigener DNS. Auf diese Weise können zudem Zellen ohne DNS-Fehler ausgewählt und letztlich auch Telomerketten verlängert werden (um Zellen jünger zu machen). Und auch bei embryonalen Stammzellen herrscht kein Forschungsstillstand, wie man beispielsweise an Projekten wie Harvards neuem Forschungszentrum sieht, oder an Kaliforniens Zusage von Forschungsgeldern in Höhe von drei Milliarden Dollar.

Die Einschränkungen der Stammzellforschung sind zwar bedauernswert, aber man kann nicht behaupten, dass die Zelltherapieforschung – geschweige denn die Biotechnik insgesamt – nennenswert davon beeinträchtigt wurde.

Einige politische Maßnahmen zeugen von jenem Fundamentalhumanismus, von dem im letzten Kapitel die Rede war. So verkündete beispielsweise der Europarat, dass „die Menschenrechte das Recht auf ein nicht künstlich verändertes genetisches Muster einschließen“.⁴¹ Am interessantesten daran ist vielleicht, dass eine Beschränkung als ein Recht dargestellt wird. Demzufolge nehme ich an, der Rat befürwortet auch das Recht darauf, nicht auf künstliche Weise von natürlichen Krankheiten geheilt zu werden – genauso wie „Aktivisten“ afrikanische Länder vor genverändertem Getreide „bewahrt“ haben.⁴²

Letzten Endes werden solche reaktionären Anti-Technik-Haltungen von den Vorteilen des technischen Fortschritts überwältigt. Bei den meisten ausgesäten Pflanzen in den USA handelt es sich um GVOs, Asien wird die Technik ebenfalls schnell in Umlauf bringen, um die riesige Bevölkerung zu ernähren, und selbst Europa beginnt nun genmanipulierte Nahrungsmittel zuzulassen. Dies ist ein wichtiges Thema, da unnötige Beschränkungen, auch wenn sie nur temporär sind, das Leiden von Millionen von Menschen verschlimmern können. Doch die technische Entwicklung schreitet an tausend Fronten voran, angetrieben durch

unwiderstehliche wirtschaftliche Möglichkeiten und Verbesserungen für Gesundheit und Wohlergehen der Menschen.

Leon Fuerths oben zitierte Beobachtung zeugt von einem weitverbreiteten Missverständnis bezüglich Informationstechnik. Wie besprochen werden nützliche Informationstechniken schnell allgemein verfügbar und fast kostenfrei. Nur am Anfang, wenn sie noch nicht richtig funktionieren (also in den frühen Entwicklungsphasen), sind sie teuer und einer Elite vorbehalten.

Im (frühen) zweiten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts wird das Netz eine umfassende virtuelle Realität bieten, deren Bilder durch unsere Brillen und Kontaktlinsen direkt auf die Netzhaut projiziert werden – der drahtlose Breitband-Internetzugang wird in unsere Kleidung eingewoben sein. Diese Technik wird es nicht nur für wenige Privilegierte geben – zur Zeit ihrer Ausreifung wird sie, genau wie Mobiltelefone, allgegenwärtig sein.

In den 2020ern werden wir standardmäßig Nanobots im Blut haben, die uns gesund halten und unsere geistigen Fähigkeiten erweitern. Auch diese Technik wird, bis sie gut funktioniert, günstig und allgemein verbreitet sein. Wie zuvor besprochen wird sich der Zeitabstand zwischen dem Erscheinen einer Technik und ihrer Verbreitung innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte von derzeit zehn Jahren auf nur wenige Jahre verkürzen. Sobald nichtbiologische Intelligenz in unserem Gehirn Fuß gefasst hat, wird sich ihre Kapazität wie bei allen Informationstechniken jährlich mindestens verdoppeln. Es wird also nicht lange dauern, bis der nichtbiologische Anteil unserer Intelligenz überwiegt. Dies wird genauso wenig wie die heutigen Internetsuchmaschinen ein Luxus der Reichen sein. Und was die Debatte anbelangt, ob solche Erweiterungen erstrebenswert sind, ist leicht abzusehen, wer gewinnen wird, denn die Menschen mit erweiterter Intelligenz werden sehr viel besser im Debattieren sein.

Die unerträgliche Langsamkeit gesellschaftlicher Institutionen. Joel Cutcher-Gershenfeld (MIT) schreibt: „Wenn man auf das letzte Jahrhundert zurückblickt, so gab es eine Serie von politischen Ordnungen, von denen jede die Lösung eines vorhergehenden Dilemmas war, aber ihrerseits in der folgenden Zeit ein neues Dilemma schuf. Tammany Hall und das

Mäzenatentum waren eine große Verbesserung gegenüber der Herrschaft des Landadels – viel mehr Menschen wurden in politische Prozesse einbezogen. Doch mit dem Mäzenatentum entstanden Probleme, die zum Beamtenstaat führten – eine gute Lösung in der neu eingeführten Leistungsgesellschaft. Das Beamtentum blockierte natürlich den Fortschritt und wir mussten die Regierung neu erfinden. Und die Geschichte geht weiter.“⁴³ Gershenfeld will damit sagen, dass gesellschaftliche Institutionen ein „Klotz am Bein des Fortschritts“ sind.

Zunächst einmal würde ich sagen, dass Konservatismus in gesellschaftlichen Institutionen kein neues Phänomen ist, sondern Teil des evolutionären Fortschrittsprozesses, und dass das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs in dem Zusammenhang bereits Wirkung gezeigt hat. Zweitens findet der Fortschritt stets Wege, die von der Gesellschaft gesetzten Schranken zu umgehen. Moderne dezentralisierte Technik ermöglicht dem Individuum, sich über alle möglichen Einschränkungen hinwegzusetzen, und stellt somit einen wichtigen Faktor für die Beschleunigung gesellschaftlichen Wandels dar. Beispielsweise werden derzeit Kommunikations-Regulationsapparate durch Direktverbindungstechniken wie dem Voice over IP (VoIP) Protokoll unterwandert.

Virtuelle Realität wird ebenfalls zur Beschleunigung gesellschaftlicher Veränderungen beitragen. Umfassende und höchst realistische virtuelle Umgebungen werden den Menschen die Möglichkeit zu Beziehungen und Aktivitäten geben, die sie in der Wirklichkeit nicht haben können oder wollen.

Indem die Technik ausgefeilter wird, nimmt sie immer mehr typisch menschliche Fähigkeiten an und erfordert immer weniger Anpassung. Man brauchte einiges an technischer Begabung um die ersten Heimcomputer zu benutzen, wohingegen heutige Computersysteme – Handys, MP3-Player und Internetbrowser – keine großen Ansprüche an den Benutzer stellen. Im zweiten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts werden wir regelmäßig mit virtuellen Personen interagieren, die zwar noch nicht den Turing-Test bestehen, aber über ein ausreichendes Sprachverständnis verfügen um uns als persönliche Assistenten in allen möglichen Bereichen zu dienen.

Es gab immer schon eine Mischung von früher und später Adoption neuer Paradigmen. Auch heute gibt es Menschen, die wie im siebten Jahrhundert leben möchten. Dies hält jedoch innovationsbegeisterte Menschen nicht davon ab, neue Subkulturen und soziale Konventionen zu schaffen, beispielsweise Web-Communities. Vor ein paar Jahrhunderten gab es nur eine Handvoll Menschen, wie Leonardo da Vinci oder Newton, die nach neuen Wegen suchten um die Welt zu verstehen und zu verändern. Heute macht die Gruppe der Menschen, die an sozialen und technischen Innovationen teilnehmen und zu ihrem Gelingen beitragen, einen beträchtlichen Teil der Bevölkerung aus – ein weiterer Effekt des Gesetzes vom steigenden Ertragszuwachs.

Theistische Kritik

Ein weiterer häufiger Einwand jenseits wissenschaftlicher Diskussionen lautet, dass die menschlichen Fähigkeiten von einer spirituellen Ebene abhängen, welche mit objektiven Mitteln nicht erreichbar ist. Der Philosoph und Mathematiker William A. Dembski missbilligt die Ansichten von Denkern wie Marvin Minsky, Daniel Dennett, Patricia Churchland und Ray Kurzweil, die er als „zeitgenössische Materialisten“ bezeichnet, welche „die Bewegungen und Veränderungen von Materie als für die Erklärung des menschlichen Geistes hinlänglich betrachten.“⁴⁴

Für Dembski ist „Berechenbarkeit der große Vorzug des Materialismus“ und „Sinnesleere sein großer Nachteil“. Er schreibt weiterhin: „Menschen haben Sehnsüchte*. Wir sehnen uns nach Freiheit, Unsterblichkeit und Glückseligkeit. Das Problem der Materialisten ist, dass sich diese Sehnsüchte nicht in Materie übersetzen lassen.“ Er kommt zu dem Schluss, dass Menschen nicht bloße Maschinen sein können, aufgrund der „völligen Abwesenheit extramaterieller Faktoren in solchen Systemen.“

Ich würde Dembskis Materialismusbegriff eher als „Begabungsmaterialismus“ oder besser noch als „Begabungspatternismus“ bezeichnen. Begabungsmaterialismus/-patternismus beruht auf der Feststellung, dass biologische Neuronen und ihre Verknüpfungen

beständige Muster in Materie und Energie sind, und dass ihre Funktionsweise beschrieben, verstanden, modelliert und in Replikaten oder funktional äquivalenten Reproduktionen nachgebildet werden kann. Ich benutze das Wort „Begabung“^{**}, da dieses nicht nur den engen Bereich sogenannter intellektueller Fähigkeiten, sondern all die mannigfaltigen und subtilen Formen menschlicher Interaktion mit der Welt umfasst. Denn unsere Fähigkeit Emotionen zu verstehen und darauf zu reagieren ist mindestens genauso komplex und vielseitig wie unsere Fähigkeit mit intellektuellen Problemen umzugehen.

John Searle beispielsweise erkennt an, dass Neuronen biologische Maschinen sind. Wenige ernst zu nehmende Beobachter haben Eigenschaften oder Reaktionen menschlicher Neuronen postuliert, welche Dembskis „extramaterielle Faktoren“ erfordern würden. Wenn wir das Verhalten und die Begabungen des menschlichen Körpers und Gehirns durch Muster in Materie und Energie erklären, so bedeutet das nicht, dass diese bemerkenswerten Qualitäten weniger bewundernswert sind. Dembskis Auffassung des Begriffs „Maschine“ ist nicht mehr zeitgemäß.

Dembski schreibt auch, dass „Computer, anders als Gehirne, ordentlich und präzise sind. [...] [C]omputer arbeiten deterministisch.“ Diese und andere Aussagen zeugen von einer Auffassung von Maschinen beziehungsweise von Entitäten, die aus Mustern in Materie und Energie bestehen („materielle Entitäten“), nach welcher diese auf die primitiven Mechanismen von Automaten des neunzehnten Jahrhunderts beschränkt sind. Diese Geräte, mit ihren Hunderten oder gar Tausenden von Teilen, waren ziemlich berechenbar, sehnten sich gewiss nicht nach Freiheit und hatten auch sonst keine der großartigen Fähigkeiten eines menschlichen Wesens. Das gilt auch weitgehend noch für heutige Maschinen mit ihren Milliarden von Teilen. Doch von Maschinen mit *mehreren Millionen Milliarden* interagierenden „Teilen“ – Entitäten, die so komplex sind wie menschliche Gehirne und Körper – wird man das nicht mehr behaupten können.

Des Weiteren ist es falsch zu behaupten, Materialismus sei vorhersehbar. Selbst heutige Computerprogramme bedienen sich häufig simulierter Zufälligkeit. Für Prozesse, die echte Zufallseignisse benötigen, gibt es

entsprechende Hardware. Im Grunde genommen ist alles, was wir in der materiellen Welt sehen, das Ergebnis vieler Billionen quantenmechanischer Ereignisse – und jedes davon stellt eine grundsätzliche, absolute Zufälligkeit im Kern der physikalischen Realität dar. (So scheint es zumindest – die Wissenschaft hat noch kein einheitliches Urteil über die Natur dieser Ereignisse gefällt). Die materielle Welt ist – im Großen wie im Kleinen – alles andere als vorhersehbar.

Zwar entsprechen viele Computerprogramme tatsächlich Dembskis Beschreibung, doch in meinem Fachgebiet, der Mustererkennung, kommt vorwiegend biologisch inspirierte chaotische Berechnung zum Einsatz. In solchen Systemen ergeben sich aus den Interaktionen von Millionen von Prozessen (viele davon mit zufälligen oder unvorhersehbaren Elementen) unvorhersehbare, aber dennoch angemessene Antworten auf subtile Erkennungsprobleme. Menschliche Intelligenz basiert zum Großteil auf eben solchen Mustererkennungsprozessen.

Unsere emotionalen Reaktionen und unsere höchsten Sehnsüchte sind als emergente Eigenschaften zu betrachten – sehr tiefgründige Eigenschaften natürlich, aber dennoch emergente Muster, die sich aus der Interaktion des Gehirns mit seiner komplexen Umwelt ergeben. Die Komplexität und Begabung nichtbiologischer Wesen wächst exponentiell und wird in einigen Jahrzehnten die biologischer Systeme, einschließlich des menschlichen Gehirns (inklusive des restlichen Nervensystems und des Hormonsystems), erreicht haben. Viele zukünftige Maschinen werden biologisch inspiriert sein, also nach natürlichen Vorbildern konzipiert. (Das gilt auch bereits für viele heutige Systeme). Meine These lautet, dass zukünftige nichtbiologische Wesen, die über die Komplexität und die Muster des menschlichen Gehirns verfügen, über dieselbe Intelligenz und Emotionalität (zum Beispiel „Sehnsüchte“) wie Menschen verfügen werden.

Werden solche nichtbiologischen Wesen ein Bewusstsein haben? Searle behauptet, dass wir diese Frage (zumindest theoretisch) beantworten können, indem wir überprüfen, ob sie über „bestimmte neurobiologische Prozesse“ verfügen. Meiner Ansicht nach wird letztlich die breite Mehrheit der Menschen zu der Überzeugung gelangen, dass solche vom Menschen abgeleiteten (aber dennoch nichtbiologischen) intelligenten Wesen bewusst

sind – aber das ist eine politische und psychologische Einschätzung, kein wissenschaftliches oder philosophisches Urteil. Unterm Strich bin ich mit Dembski einer Meinung, dass es sich nicht um eine wissenschaftliche Frage handelt, da sie nicht durch objektive Beobachtung beantwortet werden kann. Manche sind der Meinung, dass Fragen, die nicht wissenschaftlich sind, nicht wichtig oder gar keine richtigen Fragen sind. Meiner Ansicht nach (und Dembski würde sicherlich zustimmen) ist die Frage, gerade weil sie nicht wissenschaftlich ist, eine philosophische Frage – und zwar eine von fundamentaler Bedeutung.

Dembski schreibt: „Wir müssen uns selbst überwinden um uns zu finden. Die Bewegungen und Veränderungen von Materie aber bieten keinerlei Möglichkeit zur Selbstüberwindung. [...] Freud, [...] Marx, [...] Nietzsche, [...] betrachteten alle die Hoffnung auf Transzendenz als ein Trugbild.“ Diese Beschreibung von Transzendenz als ultimatives Ziel macht Sinn. Ich widerspreche jedoch der Behauptung, dass die materielle Welt „keinerlei Möglichkeit zur Selbstüberwindung“ bietet. Die materielle Welt befindet sich inhärent in ständiger Entwicklung, und jede Stufe transzendiert die vorhergehende. Wie in **Kapitel 7** besprochen bewegt sich Evolution stets in Richtung größerer Komplexität, größerer Eleganz, größeren Wissens, größerer Intelligenz, größerer Schönheit, größerer Kreativität, größerer Liebe. Und Gott wurde durch all diese Dinge charakterisiert, mit einem Unterschied: unendliches Wissen, unendliche Intelligenz, unendliche Schönheit, unendliche Kreativität und unendlich Liebe. Evolution erreicht keine Unendlichkeit, doch mit ihrer exponentiellen Explosion bewegt sie sich gewiss in diese Richtung. Evolution bewegt sich also unaufhaltsam in Richtung dessen, was wir als Gott verstehen, erreicht jedoch nie völlig dieses Ideal.

Dembski fährt fort:

Eine Maschine ist vollständig determiniert durch ihren Aufbau, ihre Dynamik und die Beziehungen ihrer physischen Bestandteile. [...] „[M]aschinen“ betont die völlige Abwesenheit extramaterieller Faktoren. [...] In dieser Diskussion ist das Ersetzungsprinzip von Bedeutung, da es impliziert, dass Maschinen keine substanzielle Geschichte haben. [...] Aber eine Maschine hat genau genommen keine Geschichte. Ihre Geschichte ist eine überflüssige Beigabe – ein Zusatz, der auch ganz anders aussehen könnte, ohne dass sich etwas an der Maschine ändert. Für eine Maschine gibt es nur den Moment. [...] Maschinen greifen mit oder ohne Erfolg auf ihren Speicherinhalt zu. [...] Mutatis mutandis macht es für

die Maschine keinen Unterschied, ob ihre Speicherinhalte kontrafaktisch sind oder auf wahren Geschehnissen beruhen.

Ich brauche wohl kaum zu betonen, dass die Aussage dieses Buches ist, dass viele unserer grundsätzlichen Annahmen über die Natur von Maschinen und über die Natur des Menschen in den nächsten Jahrzehnten infrage gestellt werden. Dembskis Begriff von „Geschichte“ ist ein weiterer Aspekt der Menschlichkeit, der auf der Vielfalt, Tiefgründigkeit und Komplexität des Menschen beruht. Anders gesagt: das Fehlen einer Geschichte in Dembskis Sinne ist lediglich ein weiteres Attribut der Simplizität der Maschinen, die wir bisher gesehen haben. Meine These lautet jedoch, dass es ab den 2030ern Maschinen geben wird, die so komplex und hochentwickelt sind, dass ihr Verhalten auf Emotionen, Sehnsüchte und, ja, eine Geschichte hindeutet. Dembski beschreibt also lediglich die heutigen beschränkten Maschinen und nimmt einfach an, dass ihre Beschränkung inhärent ist – die Argumentation lautet in anderen Worten: „Die Maschinen von heute haben keine menschlichen Fähigkeiten, folglich werden Maschinen niemals solche Fähigkeiten haben.“ Dembski macht die Schlussfolgerung zur Annahme.

Nach Dembski bleibt die Fähigkeit von Maschinen, ihre eigene Geschichte zu reflektieren, auf das „Zugreifen“ auf Speicherinhalte beschränkt. Zukünftige Maschinen werden jedoch nicht nur über Aufzeichnungen ihrer Geschichte verfügen, sondern diese Geschichte auch verstehen und intelligent darüber reflektieren können. Diese Aufzeichnungen können natürlich auch „kontrafaktisch“ sein – doch das gilt ebenso für menschliche Erinnerungen.

Dembski fasst seine Ausführungen über Spiritualität folgendermaßen zusammen:

Doch wie können sich Maschinen der Gegenwart Gottes bewusst sein? Wie wir wissen, sind Maschinen vollständig durch ihren Aufbau, ihre Dynamik und die Beziehungen ihrer physischen Bestandteile definiert. Folglich kann Gott sich einer Maschine nicht bemerkbar machen, indem er auf sie einwirkt und ihren Zustand verändert. Denn sobald Gott auf eine Maschine einwirkt und ihren Zustand verändert, handelt es sich nicht mehr wirklich um eine Maschine, da dann ein Teil der Maschine seine physische Beschaffenheit transzendiert. Das Bewusstsein der Gegenwart Gottes muss folglich unabhängig sein von jeglichem göttlichen Eingreifen zur Änderung des Zustands der Maschine. Wie wird sich die Maschine also der Gegenwart Gottes bewusst? Das Bewusstsein muss selbstinduziert sein. Maschinen-

Spiritualität ist die Spiritualität der Selbstrealisierung, nicht die Spiritualität eines sich aktiv offenbarenden Gottes, der das Wesen, mit dem er in Verbindung steht, verwandelt. Dass Kurzweil „Maschinen“ mit dem Attribut „spirituell“ versieht, zeugt von einem verarmten Spiritualitätsbegriff.

Dembski sagt, dass ein Wesen (zum Beispiel eine Person) sich Gottes Gegenwart nicht bewusst sein kann, ohne dass Gott auf dieses Wesen einwirkt, wobei Gott nicht auf eine Maschine einwirken kann, weshalb Maschinen kein Bewusstsein der Gegenwart Gottes haben können. Eine solche Argumentation ist tautologisch und anthropozentrisch. Gott steht in Verbindung mit den Menschen, aber nur mit den biologischen. Ich habe kein Problem, wenn Dembski dies zu seinem persönlichen Glauben macht, er liefert jedoch keine starken Argumente dafür, sondern behauptet lediglich: „Menschen sind keine Maschinen – Punkt.“ Genau wie Searle macht Dembski die Schlussfolgerung zur Annahme.

Dembski scheint wie Searle das Prinzip emergenter Eigenschaften komplexer, verteilter Muster nicht begreifen zu können. Er schreibt:

Wut ist vermutlich mit bestimmten lokalen Erregungen des Gehirns korreliert. Doch lokale Erregungen erklären Wut nicht besser als mit Wut assoziiertes Verhalten, wie lautes Fluchen. Lokale Erregungen des Gehirns mögen zuverlässig mit Wut korrelierbar sein, doch wodurch lässt sich erklären, dass eine Person einen Kommentar als Beleidigung auffasst und wütend wird, während eine andere Person denselben Kommentar als Scherz versteht und darüber lacht? Eine komplett materialistische Erklärung des Geistes muss lokale Erregung anhand anderer lokaler Erregungen interpretieren. Doch wie wir sehen müssen wir lokale Erregungen (die zum Beispiel Wut darstellen) durch semantische Inhalte (beispielsweise Beleidigungen) erklären. Diese Mischung von Gehirnerregungen und semantischen Inhalten ist jedoch kaum eine materialistische Erklärung für den Geist oder intelligentes Handeln.

Dembski geht davon aus, dass Wut mit einer „lokalen Erregung des Gehirns“ korreliert ist, doch Wut ist ziemlich sicher Ergebnis eines komplexen verteilten Aktivierungsmusters im Gehirn. Selbst wenn es lokale neurale Korrelationen für Wut gibt, so sind sie dennoch das Resultat des Zusammenspiels facettenreicher Muster. Dembskis Frage, weshalb verschiedene Personen in verschiedenen Situationen unterschiedlich reagieren, zwingt uns keinesfalls zur Annahme extramaterieller Faktoren. Die Gehirne und die Erfahrungen verschiedener Personen sind eindeutig unterschiedlich, was sich ganz klar durch physiologische Unterschiede

erklären lässt, die auf verschiedene Gene und Erfahrungen zurückzuführen sind.

Dembskis Lösung des Ontologieproblems ist, dass die ultimative Grundlage der Existenz in einer „wahren Welt der Dinge“ besteht, welche nicht auf materiellen Stoff reduzierbar sind. Dembski listet nicht auf, welche „Dinge“ als fundamental zu betrachten sind, doch vermutlich gehört der menschliche Geist dazu – so wie andere Dinge dazugehören könnten, zum Beispiel Geld und Stühle. Möglicherweise gibt es hier eine kleine Überschneidung unserer Standpunkte. Ich betrachte Dembskis „Dinge“ als Muster. Geld beispielsweise ist ein weitverbreitetes und beständiges Muster von Vereinbarungen, Verständnissen und Erwartungen. Das Muster „Ray Kurzweil“ ist vielleicht weniger weit verbreitet, aber ebenfalls beständig. Dembski scheint Muster als flüchtig und nicht so bedeutend zu betrachten, ich jedoch habe tiefen Respekt vor der Macht und Beständigkeit von Mustern. Es ist nicht unvernünftig, Muster als fundamentale ontologische Realität zu betrachten. Wir können Materie und Energie nicht direkt berühren, aber wir können die Muster, auf denen Dembskis „Dinge“ beruhen, direkt erfahren. Wichtig ist dabei, dass wir, indem wir unsere Intelligenz und ihre Erweiterung namens Technik einsetzen, um die machtvollen Muster unserer Welt (zum Beispiel menschliche Intelligenz) zu verstehen, diese Muster in anderen Substraten nachbilden – und erweitern! – können. Muster sind wichtiger als der Stoff, aus dem sie bestehen.

Sollte aber Dembskis Intelligenz-erweiternder extramaterieller Stoff wirklich existieren, so würde ich gerne wissen, wo ich ihn herbekommen kann.

Holismus-Kritik

Eine weitere häufige Kritik lautet wie folgt: Maschinen sind in fest strukturierten Modulhierarchien organisiert, während Biologie auf holistisch organisierten Elementen beruht, das heißt jedes Element beeinflusst alle anderen Elemente. Die einzigartigen biologischen Fähigkeiten (so wie menschliche Intelligenz) können nur durch einen

solchen holistischen Aufbau zustande kommen. Des Weiteren ist dieses Aufbauprinzip ausschließlich in biologischen Systemen möglich.

Michael Denton (Biologe an der University of Otago in Neuseeland) benennt scheinbare Unterschiede zwischen dem Aufbauprinzip von biologischen Wesen und den ihm bekannten Maschinen. Denton beschreibt Organismen eloquent als „selbst-organisierend, [...] selbst-referenziell, [...] reziprok, [...] selbst-gestaltend und [...] holistisch.“⁴⁵ Dann macht er den haltlosen Argumentationsschritt – einen Schritt ins Ungewisse könnte man sagen – zu behaupten, dass solche Organismen nur durch biologische Prozesse entstehen können, und dass es sich dabei um „unveränderliche, undurchdringliche und fundamentale“ Formen der Existenz handelt.

Ich teile Dentons „ehrfürchtige Bewunderung“ der Schönheit, Feingliedrigkeit, Seltsamkeit organischer Systeme und ihrer Wechselwirkungen, angefangen beim „schauerlich fremdartigen [...] Eindruck“, den asymmetrische Proteine hinterlassen, bis hin zur außerordentlichen Komplexität höherer Organe wie dem menschlichen Gehirn. Des Weiteren stimme ich mit Denton darin überein, dass biologische Aufbauten eine reichhaltige Sammlung von Prinzipien darstellen. Meine These, die weder von Denton noch von anderen Kritikern der holistischen Schule anerkannt und beantwortet wird, lautet, dass Maschinen (das heißt, aus menschlicher Konzeption hervorgegangene Entitäten) von eben diesen Prinzipien Gebrauch machen können – und es bereits tun. Dies ist die Stoßrichtung meiner eigenen Arbeit und stellt den Trend der Zukunft dar. Ideen der Natur zu emulieren ist die effektivste Art, das enorme Potenzial zukünftiger Technik auszuschöpfen.

Biologische Systeme sind nicht komplett holistisch, und heutige Maschinen sind nicht komplett modular; beide Systemarten bewegen sich in einem Kontinuum. Wir können funktionale Einheiten in natürlichen Systemen identifizieren, selbst auf molekularer Ebene, und auf der Ebene von Organen und Gehirnregionen sind einzelne Funktionsmechanismen noch eindeutiger unterscheidbar. Die Erforschung der Funktionalität und der durchgeführten Informationsverarbeitung in einzelnen Gehirnregionen befindet sich in vollem Gange, wie wir in **Kapitel 4** gesehen haben.

Die Behauptung, dass jeder Aspekt des menschlichen Gehirns mit jedem anderen seiner Aspekte interagiert, und dass es daher unmöglich ist, die Methoden des Gehirns zu ergründen, ist irreführend. Forscher haben bereits die Informationsverarbeitung in mehreren Dutzenden Gehirnregionen untersucht und modelliert.

Auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Beispiele für Maschinen, die nicht modular aufgebaut sind, sondern einen eng verwobenen Aufbau besitzen – beispielsweise Implementierungen der in **Kapitel 5** beschriebenen genetischen Algorithmen. Denton schreibt:

Fast alle professionellen Biologen wählen heute den mechanistisch/ reduktionistischen Ansatz und gehen davon aus, dass die Grundkomponenten eines Organismus (wie die Zahnräder einer Uhr) das Entscheidende sind, dass ein Organismus (wie eine Uhr) nicht mehr als die Summe seiner Teile ist, dass die Teile die Eigenschaften des Ganzen bestimmen, und dass (wie bei einer Uhr) eine komplette Beschreibung aller Eigenschaften eines Organismus durch die Beschreibung seiner isolierten Teile erreicht werden kann.

Auch Denton ignoriert hier das Potenzial komplexer Prozesse, emergente Eigenschaften an den Tag zu legen, die über die „isolierten Teile“ hinaus gehen. In der Natur hingegen scheint er dieses Potenzial zu erkennen, wenn er schreibt: „Organische Formen [...] repräsentieren in einem sehr realen Sinne echte emergente Formen der Existenz.“ Jedoch ist es kaum nötig, auf Dentons „vitalistisches Modell“ zurückzugreifen, um emergente Formen der Existenz zu erklären. Emergente Eigenschaften entstehen durch die Macht der Muster – und nichts beschränkt Muster und ihre emergenten Eigenschaften auf natürliche Systeme.

Denton erkennt offenbar an, dass es möglich ist, natürliche Vorgänge zu emulieren, wenn er schreibt:

Für eine erfolgreiche künstliche Herstellung organischer Formen, von Proteinen bis zu ganzen Organismen, wird darum ein völlig neuer Ansatz erforderlich sein, eine Art „Top-Down-Design“. Da die Teile eines organischen Ganzen nur in diesem Ganzen existieren, kann ein organisches Ganzes nicht Stück für Stück beschrieben und aus einer Reihe relativ unabhängiger Module aufgebaut werden; folglich muss die ganze, ungeteilte Einheit *in toto* beschrieben werden.

Hier gibt Denton vernünftige Ratschläge und beschreibt eine Vorgehensweise, die ich und andere standardmäßig in den Bereichen Mustererkennung, Komplexitätstheorie (Chaostheorie) und

selbstorganisierende Systeme anwenden. Denton scheinen diese Methodiken jedoch nicht bekannt zu sein. Er beschreibt die Beschränkungen komponentenorientierter Bottom-up-Entwicklung und schließt daraus ungerechtfertigterweise, dass eine unüberbrückbare Kluft zwischen den beiden Ansätzen besteht. Die Brücke befindet sich jedoch längst in Konstruktion.

Wie in **Kapitel 5** beschrieben können wir durch künstliche Evolution unsere eigenen „schauerlich andersartigen“, aber effektiven Konstruktionsprinzipien schaffen. Ich habe beschrieben, wie sich die Prinzipien der Evolution anwenden lassen, um intelligente Konstruktionen durch genetische Algorithmen zu entwickeln. Die Ergebnisse dieses Ansatzes entsprechen nach meiner Erfahrung ziemlich genau Dentons Beschreibung organischer Moleküle mit „scheinbar unlogischem Aufbau und einem Mangel an jeglicher ersichtlicher Modularität oder Regularität, [...] dem schieren Chaos der Anordnung, [...] [und einem] nicht-mechanischen Eindruck.“

Genetische Algorithmen und andere selbstorganisierende Bottom-up-Methoden (wie neuronale Netze, Markovmodelle und andere – siehe Kapitel 5) beinhalten unvorhersehbare Elemente, weshalb das Ergebnis solcher Systeme bei jedem Durchlauf anders ist. Entgegen der verbreiteten Annahme, Maschinen seien deterministisch und somit berechenbar, können sich Maschinen diverser Quellen der Zufälligkeit bedienen. Aktuelle quantenmechanische Theorien postulieren profunde Zufälligkeit im Kern aller Existenz. Manchen quantenmechanischen Theorien zufolge ist das scheinbar deterministische Verhalten von Systemen auf der Makro-Ebene lediglich das statistisch extrem wahrscheinliche Ergebnis einer immensen Anzahl völlig zufälliger Ereignisse. Des Weiteren haben die Arbeiten von Stephen Wolfram und anderen gezeigt, dass selbst ein theoretisch komplett deterministisches System praktisch zufällige und vor allen Dingen völlig unvorhersehbare Ergebnisse produzieren kann.

Genetische Algorithmen und ähnliche selbstorganisierende Methoden liefern Aufbaubeschreibungen, die mit einem modularen, komponentenorientierten Ansatz nicht gefunden werden können. Die „Seltsamkeit, [...] [das] Chaos, [...] die dynamische Interaktion“ der Teile

des Ganzen, die Denton exklusiv organischen Strukturen zuschreibt, finden sich ebenso in den Ergebnissen jener menschengemachten chaotischen Prozesse.

Im Zuge meiner eignen Arbeit mit genetischen Algorithmen habe ich den Prozess untersucht, durch welchen solche Algorithmen ein bestimmtes Konzept verbessern. Genetische Algorithmen erreichen ihr Ziel nicht durch die Entwicklung einzelner Teilsysteme, sondern durch ein inkrementelles „Alles-auf-einmal-Verfahren“, bei dem viele kleine Veränderungen an allen möglichen Stellen die Lösung passender beziehungsweise „mächtiger“ machen. Die Lösung nimmt nach und nach Gestalt an und entfaltet sich von Simplizität zu Komplexität. Oft sind die so erzeugten Lösungen asymmetrisch und plump, aber effektiv – zuweilen können sie jedoch, genau wie in der Natur, elegant und sogar schön aussehen.

Denton hat recht damit, dass die meisten heutigen Maschinen modular aufgebaut sind. Diese traditionelle Methode hat einige wichtige Vorteile. Beispielsweise haben Computer sehr viel genauere Speicher als Menschen und können logische Transformationen sehr viel effektiver durchführen als nicht-unterstützte menschliche Intelligenz. Vor allen Dingen können Computer ihre Speicherinhalte und Muster augenblicklich übertragen. Der chaotische nicht-modulare Ansatz der Natur hat jedoch ebenfalls klare, von Denton treffend beschriebene Vorteile – was sich in den machtvollen menschlichen Mustererkennungsfähigkeiten äußert. Es ist jedoch ein völlig ungerechtfertigter Argumentationssprung, aufgrund der derzeitigen (im Schwinden begriffenen!) Einschränkungen menschengemachter Technik zu behaupten, biologische Systeme seien inhärent – und sogar ontologisch – etwas anderes.

Die exquisiten Konstruktionen der Natur (das Auge zum Beispiel) sind das Ergebnis ausgiebiger Evolution. Unsere derzeit komplexesten genetischen Algorithmen beruhen auf Zehntausende Bits langen genetischen Codes, während biologische Wesen (wie der Mensch) durch Codes mit Milliarden von Bits (komprimiert nur einige zehn Millionen Bits) beschrieben sind.

Die Komplexität genetischer Algorithmen steigt jedoch – wie für Informationstechnik üblich – exponentiell. Wenn wir die Steigerungsrate

dieser Komplexität betrachten, so stellen wir fest, dass sie in etwa zwei Jahrzehnten die Komplexität menschlicher Intelligenz erreichen wird, was konsistent ist mit den direkt in Software und Hardware zu beobachtenden Entwicklungen.

Denton weist darauf hin, dass uns die dreidimensionale Faltung von Proteinen noch nicht geglückt ist, „selbst von solchen, die aus nur 100 Komponenten bestehen“. Doch wir verfügen erst seit einigen Jahren über die Mittel, diese dreidimensionalen Muster auch nur zu visualisieren. Des Weiteren wird die Modellierung der atomaren Wechselwirkungen Rechenleistungen in der Größenordnung von hunderttausend Milliarden (10^{14}) Operationen pro Sekunde erfordern. Ende 2004 brachte Intel eine neue Version des Blue Gene/L Supercomputers heraus, mit einer Kapazität von siebzig Teraflops (fast 10^{14} cps), welcher, wie der Name vermuten lässt, zur Proteinfaltung in der Lage sein soll.

Uns ist es bereits gelungen Gensequenzen zuzuschneiden, zu spleißen und ihre Anordnung zu verändern; wir haben die Produktion von Enzymen und anderen komplexen biologischen Substanzen durch die biochemischen Fabriken der Natur unserem Willen unterworfen. Es stimmt, dass die meisten Eingriffe dieser Art auf zweidimensionaler Ebene geschehen, doch die nötigen Rechenressourcen für die Visualisierung und Modellierung der sehr viel komplexeren dreidimensionalen Muster wird nicht mehr lange auf sich warten lassen.

In Diskussionen über dieses Thema mit Denton selbst erkannte dieser an, dass das Problem wohl irgendwann gelöst werden kann – nach seiner Schätzung in vielleicht zehn Jahren. Die Tatsache, dass eine technische Leistung *noch* nicht gelungen ist, ist kein gutes Argument dafür, dass sie niemals gelingen wird.

Denton schreibt:

Es ist unmöglich, anhand der Gene eines Organismus die darin kodierte organischen Formen vorherzusagen. Weder die Eigenschaften noch die Struktur von individuellen Proteinen oder von Proteinen in Strukturen höherer Ordnung – wie Ribosomen und ganzen Zellen – können durch eine noch so ausgiebige Analyse von Genen und ihrem Hauptprodukt, den linearen Aminosäureketten, abgeleitet werden.

Dentons obenstehende Beobachtung ist zwar grundsätzlich richtig, besagt jedoch lediglich, dass das Genom nur ein Teil des ganzen Systems ist. Der DNS-Code ist nicht alles – ohne den Rest der molekularen Maschinerie kann das System nicht funktionieren oder verstanden werden. Wir müssen auch den Aufbau des Ribosoms und anderer Moleküle kennen, um die DNS-Maschinerie zum Laufen zu bringen. Dies vergrößert den Informationsumfang biologischer Aufbaubeschreibungen jedoch nicht nennenswert.

Für die Nachbildung der massiv parallelisierten, digital gesteuerten, analogen, hologrammartigen, selbstorganisierenden und chaotischen Prozesse des menschlichen Gehirns müssen wir jedoch keine Proteine falten. Wie in **Kapitel 4** besprochen gibt es bereits Dutzende Projekte, die neurale Systeme erfolgreich und detailliert nachgebildet haben. Dazu gehören Neuroimplantate, die im Gehirn von Menschen erfolgreich ihren Dienst tun, ohne irgendwelche Proteine zu falten. Ich verstehe zwar Dentons Argument, dass Proteine ein Hinweis auf die holistische Beschaffenheit der Natur sind, doch wie gesagt gibt es keine wirklichen Hindernisse, die uns davon abhalten würden, diese Beschaffenheit in unserer Technik zu emulieren – und wir haben auch schon längst damit begonnen.

Um es zusammenzufassen: Denton zieht – viel zu voreilig – den Schluss, dass komplexe physikalische Systeme aus Materie und Energie niemals die „emergenten [...] wesentlichen Charakteristiken von Organismen“ aufweisen können, wie „Selbst-Replikation, Wandlungsfähigkeit, Selbst-Regeneration, Selbst-Assemblierung und die holistische Ordnung biologischen Aufbaus“, und dass darum „Organismen und Maschinen in verschiedene Kategorien des Seins gehören.“ Dembski und Denton betrachten Maschinen als Entitäten, die lediglich modular konzipiert und gebaut werden können. Doch wir können „Maschinen“ bauen – und tun es bereits –, deren Fähigkeiten weit über die Summe ihrer Teile hinausgehen, weil sie die selbstorganisierenden Aufbauprinzipien der natürlichen Welt mit dem beschleunigenden Potenzial der durch den Menschen initiierten Technik kombinieren. Das wird eine großartige Mischung.

Epilog

Ich weiß nicht, wie die Welt mich sieht, doch mir selbst erschien ich immer wie ein kleiner Junge, der am Meeresufer spielend hin und wieder eine außergewöhnlich glatte Perle oder eine besonders schöne Muschel findet, während der große Ozean der Wahrheit unentdeckt vor ihm liegt.

ISAAC NEWTON¹

Der Sinn des Lebens ist kreative Liebe. Nicht Liebe als Gefühl, als persönliche sentimentale Emotion, sondern Liebe als dynamische Kraft, die in die Welt hinausdrängt, um etwas Originelles zu tun.

TOM MORRIS, *IF ARISTOTLE RAN GENERAL MOTORS*

Kein Exponentialtrend hält ewig an [...], doch „ewig“ lässt sich hinauszögern.

GORDON E. MOORE, 2004

Wie singulär? Wie singulär ist die Singularität? Wird sie augenblicklich eintreten? Betrachten wir noch einmal die Herkunft des Wortes. In der Mathematik ist eine Singularität ein Wert, der jede Schranke übersteigt – also praktisch unendlich ist.* (Formal betrachtet ist der Wert einer Funktion, die eine Singularität enthält, am Punkt der Singularität undefiniert. Es lässt sich jedoch zeigen, dass die Funktionswerte benachbarter Punkte jeden beliebigen endlichen Wert übersteigen.)²

Die in diesem Buch beschriebene Singularität erreicht keine unendlichen Werte, was Berechnung, Speicher und andere messbare Größen betrifft. Sie wird jedoch mit Sicherheit in all diesen Bereichen (einschließlich Intelligenz) ein extrem hohes Level erreichen. Durch das Reverse Engineering des menschlichen Gehirns werden wir die parallelen,

selbstorganisierenden, chaotischen Algorithmen der menschlichen Intelligenz auf enorm leistungsstarke Berechnungssubstrate übertragen können. Diese Intelligenz wird dann in der Lage sein, ihren eigenen Aufbau – sowohl ihrer Hardware als auch ihrer Software – in einem schnell beschleunigenden Iterationsprozess zu verbessern.

Doch es scheint immer noch eine Grenze zu geben. Die maximale Intelligenzkapazität unseres Universums scheint etwa bei 10^{90} Berechnungen pro Sekunde zu liegen (siehe **Kapitel 6**). Es gibt Theorien (beispielsweise das „holografische Universum“), die auf eine größere Kapazität (beispielsweise 10^{120}) hindeuten, doch in jedem Fall gibt es einen endlichen Grenzwert.

Natürlich sind die Möglichkeiten einer solchen Intelligenz für alle praktischen Zwecke zumindest scheinbar grenzenlos. Ein von Intelligenz gesättigtes Universum mit 10^{90} cps wäre eine Billion Billionen Billionen Billionen Billionen Mal leistungsfähiger als alle heute existierenden biologischen Menschengehirne zusammen.³

Selbst ein 1kg-schwerer „kalter“ Computer hat ein Spitzenpotenzial von 10^{42} cps (siehe **Kapitel 3**) – zehntausend Billionen (10^{16}) Mal mehr als alle biologischen Menschengehirne.⁴

Dank der Exponentialdarstellung können wir problemlos mit riesigen Zahlen umgehen, die eigentlich unsere Vorstellungskraft weit übersteigen. Wir können uns vorstellen, dass unsere zukünftige Intelligenz in andere Universen vordringt. Ein solches Szenario ist nach unserem derzeitigen kosmologischen Verständnis denkbar, wenn auch spekulativ. Dadurch könnte unsere zukünftige Intelligenz vielleicht alle Grenzen überschreiten. Wenn wir die Fähigkeit erlangen würden, neue Universen zu erschaffen und zu kolonialisieren (und falls das überhaupt möglich sein sollte, wird es der enormen Intelligenz unserer zukünftigen Zivilisation wahrscheinlich auch gelingen), so könnte sich unsere Intelligenz über jede endliche Grenze hinaus vergrößern – und genau das ist es, was auch eine Singularität in einer mathematischen Funktion auszeichnet.

Wie unterscheidet sich der historische Gebrauch von „Singularität“ von der heutigen Benutzung des Wortes in der Physik? Die Physiker, welche schon immer eine Neigung zu anthropomorphen Bezeichnungen hatten

(Beispiel: „Charm“- und „Strange“-Quarks), entlehnten das Wort aus der Mathematik. In der Physik bezeichnet „Singularität“ einen theoretisch ausdehnungslosen Punkt von unendlicher Dichte und Masse, an welchem die Gravitation unendlich hoch ist. Aufgrund der Unschärferelation kann es jedoch eigentlich keine Punkte von unendlicher Dichte geben, und überhaupt lässt die Quantenmechanik keine unendlichen Werte zu.

Genau wie die in diesem Buch besprochene Singularität bezeichnet eine physikalische Singularität Werte von unvorstellbarer Größe. Beim Gegenstand des physikalischen Interesses handelt es sich nicht wirklich um einen ausdehnungslosen Punkt, sondern um den Ereignishorizont, der die theoretische Singularität im Inneren eines Schwarzen Lochs (welches gar nicht wirklich schwarz ist) umgibt. Innerhalb des Ereignishorizonts ist die Gravitation so stark, dass Teilchen und Energie (einschließlich des Lichts) nicht entkommen können. Darum können wir nicht ohne Weiteres sichere Aussagen darüber treffen, was hinter dem Ereignishorizont vonstattengeht.

Es scheint jedoch eine Möglichkeit zu geben, ins Innere von Schwarzen Löchern zu blicken, denn Schwarze Löcher geben einen Regen von Teilchen von sich. Partikel-Antipartikel-Paare entstehen in der Nähe des Ereignishorizonts (so wie überall im Weltall), und in manchen Fällen wird eines der beiden Teilchen in das Schwarze Loch gezogen, während das andere entkommt. Die entkommenden Teilchen bilden die sogenannte Hawking-Strahlung – benannt nach ihrem Entdecker Stephen Hawking. Derzeit ist man der Ansicht, dass diese Strahlung widerspiegelt, was im Inneren des Schwarzen Lochs vor sich geht (in einer kodierten Weise, infolge von Quantenverschränkungen mit den Teilchen im Inneren). Hawking sträubte sich anfänglich gegen diese Erklärung, scheint ihr aber mittlerweile zuzustimmen.

Wie wir sehen, ist die Verwendung des Begriffs „Singularität“ in diesem Buch nicht weniger angebracht als in der Physik. Es ist schwer, hinter den Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs zu blicken – und genauso schwer ist es, hinter den Ereignishorizont der historischen Singularität in unserer Zukunft zu blicken. Wie sollen wir uns mit unseren auf 10^{16} bis 10^{19} cps beschränkten Gehirnen vorstellen, zu was für Handlungen und Gedanken unsere zukünftige Zivilisation im Jahre 2099 mit ihren 10^{60} cps fähig ist?

Dennoch können wir durch abstraktes Denken Schlüsse über die Natur von Schwarzen Löchern ziehen, ohne je eines von innen gesehen zu haben – und gleichermaßen reicht auch unser heutiges Denken aus, um sinnvolle Aussagen über die Auswirkungen der Singularität zu treffen. Genau das ist es, was ich in diesem Buch zu tun versucht habe.

Der Mensch im Mittelpunkt. Eine verbreitete Ansicht ist, dass die Wissenschaft fortwährend die aufgeblasenen Vorstellungen von unserer eigenen Bedeutung korrigiert hat. Stephen Jay Gould sagte: „Die einzige Gemeinsamkeit der bedeutendsten wissenschaftlichen Revolutionen besteht in der Entthronung der menschlichen Arroganz, die nach und nach ihrer Überzeugung von unserer zentralen Rolle im Kosmos beraubt wird.“⁵

Aber wie sich herausstellt, stehen wir doch im Mittelpunkt. Unsere Fähigkeit, in unseren Köpfen Modelle – virtuelle Realitäten – zu erstellen, war ausreichend, um eine neue Art von Evolution anzustoßen: Technik. Durch diese Entwicklung konnte der beschleunigende Fortschritt weitergehen, der mit der biologischen Evolution begann. Dieser Fortschritt wird andauern, bis das ganze Universum in unseren Händen ist.

Zusätzliche Informationen und Kontakt

Singularity.com

Auf den verschiedenen in diesem Buch besprochenen Gebieten kommt es immer schneller zu neuen Entwicklungen. Um diese besser verfolgen zu können, lade ich Sie ein, Singularity.com zu besuchen. Dort finden Sie unter anderem:

- Aktuelle Nachrichtenbeiträge
- Eine Zusammenstellung Tausender Nachrichtenbeiträge ab 2001 von KurzweilAI.net (siehe unten)
- Hunderte Artikel über verwandte Themen von KurzweilAI.net
- Recherche-Links
- Daten und Quellen zu allen Diagrammen
- Material über dieses Buch
- Auszüge aus diesem Buch
- Fußnoten online

KurzweilAI.net

Außerdem lade ich Sie ein, unsere preisgekrönte Webseite KurzweilAI.net zu besuchen. Dort finden Sie über sechshundert Artikel von über einhundert „großen Denkern“ (von denen viele in diesem Buch zitiert werden), Tausende Nachrichtenbeiträge, Auflistungen von Events und mehr. In den

letzten sechs Monaten hatten wir über eine Million Leser. Einige der zentralen Themen auf KurzweilAI.net:

- Die Singularität
- Werden Maschinen ein Bewusstsein haben?
- Ewiges Leben
- Wie baut man ein Gehirn?
- Virtuelle Realität
- Nanotechnik
- Zukunftsgefahren
- Zukunftsvisionen
- Das für und wider

Mithilfe eines einfachen Online-Formulars auf KurzweilAI.net können Sie sich für einen kostenlosen (täglichen oder wöchentlichen) Newsletter anmelden. Ihre E-Mail-Adresse wird von uns an niemanden weitergegeben.

Fantastic-Voyage.net und RayandTerry.com

Denjenigen, die ihre Gesundheit optimieren und ihre Chancen, die Singularität selbst mitzuerleben, maximieren wollen, sei der Besuch von Fantastic-Voyage.net und RayandTerry.com empfohlen. Ich habe diese Webseiten zusammen mit Dr. Terry Grossman (meinem Gesundheitsberater und Mitautor von *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever*) entwickelt. Sie enthalten ausführliche Informationen darüber, wie Sie ihre Gesundheit auf Grundlage unseres heutigen Wissens verbessern können, damit Sie geistig und körperlich fit bleiben, bis die biotechnische und die nanotechnische Revolution voll ausgereift sind.

Den Autor kontaktieren

Ray Kurzweil ist erreichbar unter ray@singularity.com.

Ein zweiter Blick auf das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs

Die folgende Analyse bildet die Grundlage für das Verständnis von evolutionären Veränderungen und von doppelt exponentiellen Phänomenen (das heißt von exponentiellem Wachstum, dessen Wachstumsrate – der Exponent – selbst exponentiell wächst). Ich werde hier das Wachstum von Rechenleistung beschreiben, wobei die Formeln für alle anderen Aspekte von Evolution ähnlich aussehen, insbesondere was Informationsprozesse und -technik anbelangt, und einschließlich unseres Wissens über menschliche Intelligenz, welches die primäre Quelle für intelligente Software ist.

Wir haben es mit drei Variablen zu tun:

V: Geschwindigkeit von Berechnungen beziehungsweise Rechenleistung (in Berechnungen pro Sekunde pro Stückkosten)

W: Weltweites Wissen, das zu Entwicklung und Bau von Rechnertechnik beiträgt

t: Zeit

In einem ersten Untersuchungsschritt beobachten wir, dass die Rechenleistung eine lineare Funktion von W ist. Wir stellen außerdem fest, dass W kumulativ ist. Dies beruht auf der Beobachtung, dass die entscheidenden Algorithmen der Technik sich inkrementell vermehren. Das Gehirn zum Beispiel ist der evolutionären Psychologie zufolge ein stark modulares Intelligenzsystem, das sich über die Zeit hinweg inkrementell entwickelte.

In anderen Worten: Rechenleistung ist eine lineare Funktion des Wissens darüber, wie man Rechner baut. Dies ist eine vorsichtige Annahme, denn im Allgemeinen vergrößern Innovationen V nicht additiv, sondern multiplikativ. Die Effekte unabhängiger Innovationen (die jeweils eine lineare Zunahme von Wissen bewirken) multiplizieren sich. Fortschritte der Halbleitertechnik (Beispiel CMOS, eine effizientere Verdrahtungsmethode) und Fortschritte der Prozessortechnik (Beispiel Pipelining) oder algorithmische Verbesserungen (Beispiel schnelle Fourier-Transformation) vergrößern V alle jeweils um einen unabhängigen Faktor.

Unsere anfänglichen Beobachtungen sind also die folgenden.

Die Rechengeschwindigkeit ist proportional zum weltweiten Wissen:

$$(1) V = c_1 W$$

Die Änderungsrate des weltweiten Wissens ist proportional zur Rechengeschwindigkeit:

$$(2) \frac{dW}{dt} = c_2 V$$

Durch Einsetzung von (1) in (2) erhalten wir:

$$(3) \frac{dW}{dt} = c_1 c_2 W$$

Die Lösung davon ist:

$$(4) W = W_0 e^{c_1 c_2 t}$$

und W wächst exponentiell mit der Zeit (e ist die Basis des natürlichen Logarithmus).

Die Daten, die ich gesammelt habe, zeigen, dass die Wachstumsrate (der Exponent) des exponentiellen Wachstums exponentiell wächst (im frühen zwanzigsten Jahrhundert verdoppelte sich die Rechenleistung alle drei Jahre, zur Jahrhundertmitte alle zwei Jahre und heute jährlich). Das exponentiell wachsende technische Potenzial bewirkt exponentielles

Wirtschaftswachstum. Dies lässt sich mindestens ein Jahrhundert weit zurückverfolgen. Rezessionen, einschließlich der Weltwirtschaftskrise, lassen sich interessanterweise als relativ schwacher Zyklus innerhalb des exponentiellen Wachstums modellieren – jedes Mal erholt sich die Wirtschaft bis zu dem Punkt, an dem sie wäre, wenn die jeweilige Rezession/Wirtschaftsdepression nie stattgefunden hätte. Industriezweige, die eng mit der exponentiell wachsenden Technik verknüpft sind – zum Beispiel die Computerindustrie – verzeichnen ein rasches exponentielles Wachstum.

Wenn wir die exponentiell wachsenden Investitionen in Rechentechnik berücksichtigen, so wird die Quelle für die zweite Ebene des exponentiellen Wachstums ersichtlich.

Wir haben wiederum:

$$(5) V = c_1 W$$

Doch nun berücksichtigen wir die Tatsache, dass die für Berechnungen aufgewandten Mittel N ebenfalls exponentiell wachsen:

$$(6) N = c_3 e^{c_4 t}$$

Die Steigerungsrate des weltweiten Wissens ist nun proportional zum Produkt der Rechengeschwindigkeit und der aufgewandten Mittel:

$$(7) \frac{dW}{dt} = c_2 NV$$

Durch Einsetzung von (5) und (6) in (7) erhalten wir:

$$(8) \frac{dW}{dt} = c_1 c_2 c_3 e^{c_4 t} W$$

Die Lösung davon ist:

$$(9) W = W_0 \exp \left(\frac{c_1 c_2 c_3}{c_4} e^{c_4 t} \right)$$

und das weltweite Wissen wächst doppelt exponentiell.

Betrachten wir nun ein paar reale Daten. In **Kapitel 3** habe ich die Rechenkapazität des menschlichen Gehirns unter Annahme einer funktionalen Simulation aller Gehirnregionen auf ungefähr 10^{16} cps geschätzt. Die Simulation sämtlicher nichtlinearer Feinheiten aller Neuronen und Verknüpfungen würde eine größere Rechenleistung erfordern: 10^{11} Neuronen mal durchschnittlich 10^3 Verknüpfungen pro Neuron (die Berechnungen finden vorwiegend in diesen Verknüpfungen statt) mal 10^2 Transaktionen pro Sekunde mal 10^3 Berechnungen pro Transaktion – insgesamt etwa 10^{19} cps. Die untenstehende Analyse geht von funktionaler Simulation (10^{16} cps) aus.

Analyse drei

Beruhend auf echten Daten über Rechengерäte und Computer des zwanzigsten Jahrhunderts:

Sei $S = \text{cps}/\$1\text{k}$: Rechenoperationen pro Sekunde für \$1.000.

Den Rechenleistungsdaten des zwanzigsten Jahrhunderts entsprechend:

$$S=10^{\left[6.00 \times \left(\frac{20.40}{6.00}\right)^{\left[\frac{\text{Jahr}-1900}{100}\right]} - 11.00\right]}$$

Wir können die Wachstumsrate G über einen Zeitraum bestimmen:

$$G=10^{\left(\frac{\log(S_c) - \log(S_p)}{Y_c - Y_p}\right)}$$

Dabei ist S_c cps/\$1k des aktuellen Jahres, S_p ist cps/\$1k des Vorjahres. Y_c ist das aktuelle Jahr, Y_p ist das Vorjahr.

Ein menschliches Gehirn = 10^{16} Rechenoperationen pro Sekunde.

Alle Menschen = 10 Milliarden (10^{10}) menschliche Gehirne = 10^{26} Rechenoperationen pro Sekunde.

Um 2023 kostet die Kapazität eines menschlichen Gehirns (10^{16} cps) \$1.000.

Um 2037 kostet die Kapazität eines menschlichen Gehirns (10^{16} cps) einen Cent.

Um 2049 kostet die Kapazität aller Menschen (10^{26} cps) \$1.000.

Wenn wir das exponentielle Wirtschaftswachstum berücksichtigen, insbesondere mit Hinblick auf für Rechnertechnik aufgewandte Mittel (bereits etwa eine Billion Dollar pro Jahr), so können wir sehen, dass nichtbiologische Intelligenz noch vor der Jahrhundertmitte Milliarden Male leistungstärker sein wird als biologische Intelligenz.

Das doppelt exponentielle Wachstum lässt sich auch auf andere Weise herleiten. Wie zuvor bemerkt war die Wachstumsrate des Wissens (dW/dt) zu jedem Zeitpunkt mindestens proportional zum Umfang des Wissens. Dies ist eindeutig eine vorsichtige Annahme, da viele Innovationen (Vergrößerungen des Wissens) sich nicht additiv, sondern multiplikativ auf die Steigerungsrate auswirken.

Wenn wir eine exponentielle Wachstumsrate der Form

$$(10) \frac{dW}{dt} = C^w$$

haben, wobei $C > 1$, so ist die Lösung davon

$$(11) W = \frac{1}{\ln C} \ln \left(\frac{1}{1 - t \ln C} \right)$$

mit logarithmischem Wachstum, solange $t < 1/\ln C$. Nahe der Singularität bei $t = 1/\ln C$ explodiert jedoch das Wachstum.

Selbst ein sehr moderates $dW/dt = W^2$ führt zu einer Singularität.

Tatsächlich hat jede Formel der Form

$$(12) \frac{dW}{dt} = W^a$$

mit $a > 1$ eine Lösung mit einer Singularität

$$(13) W = W_0 \frac{1}{(T-t)^{\frac{1}{a-1}}}$$

am Zeitpunkt T . Je höher der Wert von a , desto näher die Singularität.

Meine Ansicht ist, dass unendliches Wissen schwer vorstellbar ist angesichts der scheinbar endlichen Materie- und Energievorräte, und die derzeitigen Entwicklungen zeugen von einem doppelt exponentiellen Prozess. Der zusätzliche Term (für W) scheint die Form $W \cdot \log(W)$ zu haben. Dieser Term beschreibt einen Netzeffekt. Es lässt sich zeigen, dass der Effekt oder Wert eines Netzes wie dem Internet einigermaßen proportional zu $n \cdot \log(n)$ ist, wobei n die Anzahl der Knoten ist. Jeder Knoten (jeder Benutzer) profitiert – darum die Multiplikation mit n . Der Wert für jeden Benutzer (für jeden Knoten) = $\log(n)$. Bob Metcalfe (Erfinder des Ethernet) hat den Wert eines Netzes mit n Knoten auf $c \cdot n^2$ angesetzt, doch das ist überzogen. Wenn die Größe des Internets sich verdoppelt, so steigt auch sein Wert für mich, doch er verdoppelt sich nicht. Es lässt sich zeigen, dass der Wert eines Netzes für den einzelnen Benutzer grob proportional zum Logarithmus der Größe des Netzes ist. Somit ist sein Gesamtwert proportional zu $n \cdot \log(n)$.

Wenn die Wachstumsrate einen logarithmischen Netzeffekt beinhaltet, so erhalten wir folgende Gleichung für die Änderungsrate:

$$(14) \frac{dW}{dt} = W + W \ln W$$

Die Lösung hierfür ist eine doppelte Exponentialfunktion, wie wir sie zuvor bei den Daten gesehen haben:

$$(15) W = \exp(e^t)$$

Anmerkungen

Prolog: Die Macht der Ideen

1. Meine Mutter ist eine talentierte Künstlerin und malt vor allem Aquarelle. Mein Vater war ein renommierter Musiker, Dirigent der Bell Symphonie, Gründer und eine Zeit lang Vorsitzender des Queensborough College Music Department.
2. Die Tom-Swift-Jr.-Reihe stammt von einer Gruppe von Autoren unter dem Pseudonym Victor Appleton. Sie erschien zwischen 1954 und 1971 bei Grosset and Dunlap. Der Teenager Tom Swift durchreist darin mit seinem Kumpel Bud Barclay das Universum, erkundet seltsame Orte, besiegt die Bösen und benutzt dabei allerhand exotisches Gerät, beispielsweise ein hausgroßes Raumschiff, eine Raumstation, ein fliegendes Labor, ein pedalgetriebenes Flugzeug, eine elektrische Hydrolunge, einen tauchenden Unterwasserhelikopter und ein Repellatron. (Englisch „to repel“ bedeutet abweisen; das Repellatron ist gegen alle möglichen Substanzen abweisend, formt beispielsweise unter Wasser eine Blase, in der Tom sich aufhalten kann).

Die ersten neun Bücher der Reihe sind: *Tom Swift and His Flying Lab* (1954), *Tom Swift and His Jetmarine* (1954), *Tom Swift and His Rocket Ship* (1954), *Tom Swift and His Giant Robot* (1954), *Tom Swift and His Atomic Earth Blaster* (1954), *Tom Swift and His Outpost in Space* (1955), *Tom Swift and His Diving Seacopter*

(1956), *Tom Swift in the Caves of Nuclear Fire* (1956), und *Tom Swift on the Phantom Satellite* (1956).

3. Das Programm hieß Select. Die Schüler füllten dafür einen dreihundert Punkte umfassenden Fragebogen aus. Die Software wählte dann sechs bis fünfzehn Schulen aus, die dem Interesse, Hintergrund und Niveau der Schüler entsprachen – mithilfe einer zwei Millionen Einzelinformationen über dreitausend Colleges umfassenden Datenbank. Wir vermittelten selbst etwa zehntausend Schüler und verkauften dann das Programm an den Verlag Harcourt, Brace and World.
4. *The Age of Intelligent Machines* (1990 bei MIT Press) wurde von der Association of American Publishers als bestes computerwissenschaftliches Buch ausgezeichnet. Es untersucht die Entwicklung künstlicher Intelligenz und prognostiziert eine Reihe philosophischer, sozialer und wirtschaftlicher Auswirkungen. Mein Text wird ergänzt durch dreiundzwanzig Artikel über KI von Sherry Turkle, Douglas Hofstadter, Marvin Minsky, Seymour Papert und George Gilder. Der komplette Text ist verfügbar auf <http://www.KurzweilAI.net/aim>.
5. Entscheidende Leistungsmessgrößen (wie Preis-Leistungs-Verhältnis, Bandbreite und Kapazität) wachsen multiplikativ (die Größen vervielfachen sich in einer bestimmten Zeit um einen bestimmten Faktor) anstatt sich linear, um einen zu addierenden Betrag, zu vergrößern.
6. Douglas R. Hofstadter, *Gödel; Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (New York: Basic Books, 1979).

Kapitel 1: Die sechs Epochen

1. Der Transtopia-Seite (<http://transtopia.org/faq.html#1.11>) zufolge wurde „Singularitarist“ (engl. „singularitarian“) „ursprünglich (‘91)

von Mark Plus definiert als ‚jemand, der an das Konzept der Singularität glaubt‘, „Eine weitere Definition lautet „Singularitätsaktivist‘ oder ‚Freund der Singularität‘, also jemand, der danach strebt, die Singularität herbeizuführen (Mark Plus, 1991; *Singularitarian Principles*, Eliezer Yudkowsky, 2000)“. Es gibt keine allgemeingültige Definition, und viele Transhumanisten sind lediglich Singularitaristen im ursprünglichen Sinne, glauben also zwar an die Singularität, sind aber weniger ihre „Aktivisten“ oder gar „Freunde“.

Eliezer S. Yudkowsky schlägt in *The Singularitarian Principles*, Version 1.0.2 (Januar 1, 2000), <http://yudkowsky.net/sing/principles.ext.html>, eine alternative Bedeutung vor: „Ein Singularitarist ist jemand, der technisch erzeugte, übermenschliche Intelligenz für erstrebenswert hält und darauf hinarbeitet. Ein Singularitarist ist Freund, Advokat, Verfechter und Akteur der zukünftigen Singularität“.

Meine Ansicht: Man kann die Singularität vorantreiben und vor allem versuchen, sie möglichst konstruktiv zu gestalten, als Weiterentwicklung des menschlichen Wissens und Diskurses in vielen Bereichen. Die Singularität kann beispielsweise die Demokratie fördern, totalitäre und fundamentalistische Glaubenssysteme und Ideologien bekämpfen und Wissen in all seinen Formen generieren: Musik, Kunst, Literatur, Wissenschaft und Technik. Ein Singularitarist ist für mich jemand, der die in diesem Jahrhundert bevorstehenden Veränderungen und ihre Auswirkungen auf sein Leben begriffen hat.

2. Wir untersuchen die Verdopplungsraten von Rechenleistung später im Kapitel. Nicht nur verdoppelt sich die Menge an Transistoren, die man für einen bestimmten Prozessorpreis kaufen kann, alle zwei Jahre. Die Schaltungen werden auch schneller und auf vielen anderen Ebenen gibt es Innovationen und Verbesserungen. Die Gesamtrechenleistung (Operationen pro Sekunde) pro Stückpreis hat sich in letzter Zeit daher sogar jährlich verdoppelt – das gilt auch schon für Schachcomputer der 1990er.

3. John von Neumann, paraphrasiert von Stanislaw Ulam, „Tribute to John von Neumann“, *Bulletin of the American Mathematical Society*, 64.3, pt. 2 (Mai 1958): 1–49. Von Neumann (1903–1957), Sohn einer jüdischen Bankiersfamilie in Budapest, unterrichtete ab 1930 Mathematik an der Princeton University. 1933 wurde er dort einer von sechs Professoren des Institute for Advanced Study und verblieb dort bis an sein Lebensende. Er hatte vielseitige Interessen: Er war treibende Kraft bei der Definition der Quantenmechanik, schrieb zusammen mit Oskar Morgenstern *Theory of Games and Economic Behavior* – ein Text, der die Wirtschaftswissenschaften verändern sollte – und er leistete einen bedeutenden Beitrag zum logischen Aufbau der ersten Computer, baute selbst in den späten 1930ern MANIAC (Mathematischer Analysator, Numerischer Integrator und Computer).

Oskar Morgenstern schreibt in seinem Nachruf „John von Neumann, 1903–1957“, in *Economic Journal* (März 1958: 174): „Von Neuman hatte einen ungewöhnlich starken Einfluss auf Menschen in seinem persönlichen Umfeld. [...] Sein überwältigendes Wissen, seine Geistesgegenwart und seine beispiellose Intuition erfüllte seine Besucher stets mit Bewunderung. Oft löste er ihre Probleme, bevor sie ihren Satz beenden konnten. Sein Geist war so einzigartig, dass sich manche Leute – mitunter hervorragende Wissenschaftler – fragten, ob er nicht eine neue Entwicklungsstufe des menschlichen Verstandes darstellte.“

4. Siehe Anmerkungen 20 und 21 in **Kapitel 2**.
5. Die Konferenz fand vom 19. bis 21. Februar 2003 in Monterey, Kalifornien statt. Es ging unter anderem um Stammzellenforschung, Bio-, Nano- und Klontechnik und genveränderte Nahrungsmittel. Unter <http://www.thefutureoflife.com/books.htm> findet sich eine Liste von Büchern, die von Konferenzteilnehmern empfohlen wurden.

6. Gemessen an der Anzahl der Knoten (Server) verdoppelte sich das Internet in den 1980ern jedes Jahr, hatte aber 1985 erst einige Zehntausend Knoten. Daraus wurden bis 1995 viele Millionen. Im Januar 2003 zählte das Internet Software Consortium (<http://www.isc.org/ds/host-count-history.html>) 172 Millionen Webhoster, also Server, die Webseiten bereitstellen und lediglich einen Teil der Knoten-Gesamtzahl ausmachen.
7. Das anthropische Prinzip besagt im weitesten Sinne, dass die physikalischen Naturkonstanten so beschaffen sein müssen, dass sie unsere Existenz ermöglichen; andernfalls könnten wir sie nicht beobachten, da wir nicht existieren würden. Anstoß zu dieser Überlegung gibt unter anderem die Untersuchung von Größen wie der Gravitations- und der elektromagnetischen Kopplungskonstante. Lägen ihre Werte außerhalb eines sehr engen Bereichs, so wäre intelligentes Leben in diesem Universum nicht möglich. Wäre die Kopplungskonstante beispielsweise größer, so könnten Atome keine Elektronenpaarbindungen zueinander herstellen. Wäre sie kleiner, so blieben Elektronen nicht in ihren Atomorbitalen. In anderen Worten, befände sich diese eine Konstante außerhalb eines sehr engen Spielraumes, so kämen keine Moleküle zustande. Darum sind die Befürworter des anthropischen Prinzips der Meinung, das Universum sei genauestens auf die Evolution intelligenten Lebens abgestimmt. (Kritiker wie Victor Stenger halten das für übertrieben; aufgrund bestimmter ausgleichender Mechanismen sei das Parameterfenster für Entstehung von Leben deutlich größer).

Das Anthropische Prinzip spielt auch eine Rolle in modernen kosmologischen Theorien, welche von vielen Universen ausgehen, die jeweils anderen Gesetzen gehorchen. Nur in einem Universum, dessen Gesetze intelligente Lebewesen zulassen, können wir existieren und solche Überlegungen anstellen.

Ein wegweisender Text in dieser Debatte ist John Barrow und Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (New York: Oxford University Press, 1988). Siehe auch Steven Weinberg, „A

Designer Universe?“ auf http://www.physlink.com/Education/essay_weinberg.cfm.

8. Manche kosmologische Theorien besagen, dass es nicht nur einen Urknall gab, sondern viele, bei denen ebenso viele Universen (Paralleluniversen oder „Blasen“) entstanden. In den verschiedenen Blasen herrschen jeweils andere physikalische Kräfte und Naturkonstanten; (mindestens) eine dieser Blasen erfüllt die Bedingungen für kohlenstoffbasiertes Leben. Siehe Max Tegmark, „Parallel Universes“, *Scientific American* (Mai 2003): 41–53; Martin Rees, „Exploring Our Universe and Others“, *Scientific American* (Dezember 1999): 78–83; Andrei Linde, „The Self-Reproducing Inflationary Universe“, *Scientific American* (November 1994): 48–55.
9. Die Viele-Welten-Interpretation (Multiversum-Theorie) der Quantenmechanik wurde ursprünglich entwickelt um ein Problem der Quantenmechanik zu lösen, und wurde dann mit dem anthropischen Prinzip kombiniert. Quentin Smith fasst das folgendermaßen zusammen:

Ein großes Problem der konventionellen Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik besteht darin, dass sie nicht mit der allgemeinen Relativität der Raumzeit eines geschlossenen Universums vereinbar ist. Der quantenmechanische Zustand eines solchen Universums wird durch eine Wellenfunktion mit variabler Raumzeit-Amplitude beschrieben; die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Universum in einem bestimmten Zustand befindet, ist das Quadrat der Amplitude, welche die Wellenfunktion für diesen Zustand erreicht. Um das Universum von einer Überlagerung vieler Zustände in einen einzigen Zustand (in dem es sich tatsächlich befindet) zu überführen, ist ein externer Messapparat nötig. Durch eine Messung kollabiert die Wellenfunktion, und das Universum wird auf einen einzigen Zustand festgelegt. Das ist jedoch unmöglich, da nichts außerhalb des Universums existiert, also auch kein externer Messapparat.

Eine Möglichkeit dieses Problem zu lösen besteht darin, eine Interpretation der Quantenmechanik zu entwickeln, die sich nicht auf den in der Kopenhagener Deutung zentralen Begriff der externen Beobachtung oder Messung stützt. Quantenmechanik kann auch innerhalb eines geschlossenen Systems formuliert werden.

Eine solche Interpretation präsentierte Hugh Everett 1957 in seinem Aufsatz „Relative State Formulation of Quantum Mechanics“. Dieser zufolge beschreibt jeder Punkt einer Wellenfunktion sowohl einen Zustand des Beobachters (oder des Messapparats) als auch einen Zustand des beobachteten Systems. „Mit jeder neuen Beobachtung (oder Interaktion) ‚verzweigt‘ der Beobachter in eine Anzahl von Zuständen. Jeder der Zweige repräsentiert ein anderes Messergebnis und einen entsprechenden Zustand des beobachteten Systems.

Nach jeder Beobachtungsreihe existieren alle möglichen Zweige simultan in Superposition (Überlagerung)“.

Jeder der Zweige ist kausal unabhängig von jedem anderem Zweig, weshalb kein Beobachter sich einer „Aufspaltung“ bewusst ist. Jeder Beobachter sieht die Welt so, wie sie tatsächlich ist.

Das bedeutet, auf das Universum im Ganzen bezogen, dass sich dieses fortwährend in zahlreiche, verschiedene und kausal unabhängige Zweige aufspaltet – infolge der messungsartigen Interaktionen zwischen seinen diversen Bestandteilen. Jeden Zweig kann man als eigene Welt betrachten, die sich immerzu in weitere Welten aufteilt.

Unter der Annahme, dass diese Verzweigungen – die Menge der Universen – sowohl für Leben geeignete als auch ungeeignete Welten umfassen, schreibt Smith weiter:

Nun wird klar, wie das anthropische Prinzip in Kombination mit der Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik benutzt werden kann, um das eingangs erwähnte scheinbare Problem zu lösen. Die problematisch erscheinende Tatsache, dass ausgerechnet eine Welt mit intelligentem Leben gegenwärtig ist, und nicht eine der vielen leblosen Welten, ist nämlich gar keine Tatsache mehr. Sind nämlich sowohl Welten mit als auch ohne Leben gleichermaßen gegenwärtig, so ist es nicht überraschend, sondern selbstverständlich, dass diese unsere Welt so ist, wie sie ist.

Quentin Smith, „The Anthropic Principle and Many-Worlds Cosmologies“, *Australasian Journal of Philosophy* 63.3 (September 1985),
verfügbar unter
http://www.qsmithwmu.com/the_anthropic_principle_and_many-worlds_cosmologies.htm.

10. Siehe Kapitel 4 zum Thema Selbstorganisation des Gehirns und Mustererkennung.
11. Mit einem „linearen“ Maßstab (bei dem alle Diagrammabschnitte gleich sind) wäre es unmöglich, die gesamten Daten (über Milliarden von Jahren) auf so begrenztem Platz (einer Buchseite) zu visualisieren. Dieses Problem löst ein logarithmischer („log“) Maßstab, bei dem entlang der Achsen nicht die Werte, sondern ihre Größenordnung gleichmäßig ansteigt. Dadurch können deutlich mehr Daten sinnvoll dargestellt werden.
12. Theodor Modis, Professor an der DUXX (Hochschule für Unternehmensführung im mexikanischen Monterrey), versuchte

„ein präzises mathematisches Gesetz für die Evolution von Veränderung und Komplexität im Universum“ aufzustellen. Um die Geschichte und die Regelmäßigkeiten solcher Veränderungen zu erforschen, benötigte er einen Datensatz mit signifikanten Ereignissen, die bedeutende Entwicklungen einläuteten. Um einer Verfälschung durch die Datenauswahl entgegenzuwirken, wollte er sich nicht ausschließlich auf seine eigene Liste stützen, sondern erstellte dreizehn unabhängige Listen mit wichtigen Ereignissen in Biologie und Technik anhand folgender Quellen:

Carl Sagan, *The Dragons of Eden: Speculations on the Evolution of Human Intelligence* (New York: Ballantine Books, 1989).
Genaue Zeitangaben von Modis.

American Museum of Natural History. Genaue Zeitangaben von Modis.

Der Datensatz „important events in the history of life“ der *Encyclopaedia Britannica*.

Educational Resources in Astronomy and Planetary Science (ERAPS), University of Arizona,
<http://ethel.as.arizona.edu/~collins/astro/subiects/evolve-26.html>.

Paul D. Boyer, Biochemiker und Nobelpreisträger des Jahres 1997, private Korrespondenz. Genaue Zeitangaben von Modis.

J. D. Barrow und J. Silk, „The Structure of the Early Universe“, *Scientific American* 242.4 (April 1980): 118–28.

J. Heidmann, *Cosmic Odyssey: Observatoire de Paris*, Übersetz. Simon Mitton (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1989).

J. W. Schopf, ed., *Major Events in the History of Life*, Symposium des IGPP Center for the Study of Evolution and the Origin of Life, 1991 (Boston: Jones and Bartlett, 1991).

Phillip Tobias, „Major Events in the History of Mankind“, Kap. 6 in Schopf, *Major Events in the History of Life*.

David Nelson, „Lecture on Molecular Evolution I“, <http://drnelson.utmem.edu/evolution.html>, sowie „Lecture Notes for Evolution II“, <http://drnelson.utmem.edu/evolution2.html>.

G. Burenhult, ed., *The First Humans: Human Origins and History to 10,000 BC* (San Francisco: HarperSanFrancisco, 1993).

D. Johanson and B. Edgar, *From Lucy to Language* (New York: Simon & Schuster, 1996).

R. Coren, *The Evolutionary Trajectory: The Growth of Information in the History and Future of Earth*, World Futures General Evolution Studies (Amsterdam: Gordon and Breach, 1998).

Diese Listen stammen aus den 1980ern und 1990ern und umfassen größtenteils die gesamte bekannte Geschichte unseres Universums; drei der Listen befassen sich mit dem engeren Zeitraum der menschlichen Entwicklung. Die Daten mancher älterer Listen sind ungenau, entscheidend ist jedoch die Auswahl von Ereignissen und ihre relative Einordnung in der Geschichte.

Modis kombinierte die Listen, um Cluster (zusammengefasste Gruppen) von Ereignissen zu identifizieren, seine „kanonischen Meilensteine“. Aus den 203 Schlüsselereignissen der Listen wurden dabei 28 kanonische Meilensteine. Modis benutzte eine weitere unabhängige Liste von Coren als Gegenprobe. Siehe T. Modis, „Forecasting the Growth of Complexity and Change“, *Technological Forecasting and Social Change* 69.4 (2002); <http://ourworld.compuserve.com/homepages/tmodis/TedWEB.htm>.

13. Modis bemerkt, dass Abweichungen der Listenlängen und der Zeitangaben zu Fehlern führen können (siehe T. Modis, „The Limits of Complexity and Change“, *The Futurist* [Mai–Juni 2003], <http://ourworld.compuserve.com/homepages/tmodis/Futurist.pdf>).

Darum benutzt er jeweils eine Gruppe von Daten, um einen kanonischen Meilenstein zu definieren. Jeder Meilenstein ist ein Mittelwert, seine Standardabweichung errechnet sich aus den für die entsprechenden Daten bekannten Abweichungen. Für Ereignisse mit

nur einer Quelle nahm Modis „willkürlich die durchschnittliche Abweichung an“. Als weitere Fehlerquellen, die in der Standardabweichung nicht berücksichtigt sind, nennt Modis Ereignisse, für die kein genauer Zeitpunkt bekannt ist, oder die Möglichkeit, dass alle Quellen gleichermaßen falsch liegen.

Das Aussterben der Dinosaurier datiert Modis mit 54,6 Millionen Jahren vor unserer Zeit nicht früh genug.

14. Die synaptische Aktivierungszeit liegt typischerweise im Bereich von fünf Millisekunden, was pro Sekunde zweihundert digital gesteuerte Analogübertragungen ermöglicht. Selbst unter Berücksichtigung des nicht-linearen Charakters neuronaler Informationsverarbeitung ist das in der Größenordnung von einer Million Mal langsamer als aktuelle elektrische Bauteile, welche Schaltzeiten unter einer Nanosekunde aufweisen (siehe Analyse von Rechenkapazität in **Kapitel 2**).
15. Eine neue Untersuchung der relativen Konzentration radioaktiver Isotope im einzigen bekannten natürlichen Atomreaktor (Oklo im westafrikanischen Gabun) durch das Los Alamos National Lab ergab eine Abnahme der Feinstrukturkonstante α (umgekehrt proportional zur Lichtgeschwindigkeit) über einen Zeitraum von zwei Milliarden Jahren. Das würde eine leichte Zunahme der Lichtgeschwindigkeit bedeuten; das Ergebnis ist jedoch noch nicht bestätigt. Siehe „Speed of Light May Have Changed Recently“, *New Scientist*, 30. Juni 2004, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99996092>. Siehe außerdem <http://www.sciencedaily.com/releases/2005/05/050512120842.htm>.
16. Auf einer wissenschaftlichen Konferenz in Dublin am 21. Juli 2004 nahm Stephen Hawking eine umstrittene Behauptung über schwarze Löcher zurück, die er dreißig Jahre zuvor aufgestellt hatte. Damals hatte er die Meinung vertreten, dass es unmöglich sei, Informationen über etwas zu erlangen, das von einem Schwarzen Loch verschluckt worden ist. Dies wäre ein Widerspruch zur Quantentheorie, welche

besagt, dass Information erhalten bleibt. Auf der Konferenz sagte er: „Es tut mir leid, dass ich Science-Fiction-Fans enttäuschen muss, aber wenn die Information erhalten bleibt, besteht keine Möglichkeit, durch Schwarze Löcher in andere Universen zu reisen. Wenn du in ein Schwarzes Loch hüpfst, wird deine Masse und Energie – wenn auch in völlig zerpflückter Form – an das Universum zurückgegeben und überträgt dabei – völlig unverständliche – Informationen darüber, wie du mal warst.“ Siehe Dennis Overbye, „About Those Fearsome Black Holes? Never Mind“, *New York Times*, 22. Juli 2004.

17. Der Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs ist die Grenze eines kugelförmigen Bereichs um die Singularität (das Zentrum des Schwarzen Lochs, wo Dichte und Druck unendlich groß sind). Innerhalb dieser Grenze ist die Gravitation so stark, dass ihr nicht einmal Licht entkommen kann. (Obwohl wir heute wissen, dass Schwarze Löcher sogenannte Hawking-Strahlung aussenden: Quanteneffekte erzeugen direkt am Ereignishorizont Paare von Partikeln und Antipartikeln, von denen einer in das Schwarze Loch gesogen und der andere abgestrahlt wird). Darum nennt man diesen Bereich „Schwarzes Loch“; Professor John Wheeler erfand das Wort. Zwar sagte der deutsche Astrophysiker Kurt Schwarzschild Schwarze Löcher bereits 1916 vorher, doch erst in jüngerer Zeit konnte ihre Existenz im Zentrum von Galaxien experimentell bestätigt werden. Weiterführende Literatur: Kimberly Weaver, „The Galactic Odd Couple“, <http://www.scientificamerican.com>, Juni 2003; Jean-Pierre Lasota, „Unmasking Black Holes“, *Scientific American* (Mai 1999): 41–47; Stephen Hawking, *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes* (New York: Bantam, 1988).
18. Joel Smoller and Blake Temple, „Shock-Wave Cosmology Inside a Black Hole“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100.20 (30. September 2003): 11216–18.
19. Vernor Vinge, „First Word“, *Omni* (Januar 1983): 10.

20. Ray Kurzweil, *The Age of Intelligent Machines* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1989).
21. Hans Moravec, *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1988).
22. Vernor Vinge, „The Coming Technological Singularity: How to Survive in the Post-Human Era“, VISION-21 Symposium, mit Unterstützung des NASA Lewis Research Center and the Ohio Aerospace Institute, März 1993. Verfügbar auf <http://www.KurzweilW.net/vingesing>.
23. Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence* (New York: Viking, 1999).
24. Hans Moravec, *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind* (New York: Oxford University Press, 1999).
25. Damien Broderick, zwei Werke: *The Spike: Accelerating into the Unimaginable Future* (Sydney, Australia: Reed Books, 1997) und *The Spike: How Our Lives Are Being Transformed by Rapidly Advancing Technologies*, rev. ed. (New York: Tor/Forge, 2001).
26. Eine von John Smarts Zusammenfassungen, „What Is the Singularity“, ist verfügbar unter <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0133.html>; Für John Smarts gesammelte Schriften über Beschleunigung der technischen Entwicklung, Singularität und verwandte Themen, siehe <http://www.singularitywatch.com> und <http://www.Accelerating.org>.

John Smart leitet die „Accelerating Change“-Konferenz, welche sich mit „künstlicher Intelligenz und Intelligenzerweiterung“ beschäftigt. Siehe <http://www.accelerating.org/ac2005/index.html>.

27. Eine Emulation des menschlichen Gehirns in einem elektronischen System wäre sehr viel schneller als das biologische Original. Das Gehirn profitiert zwar von seiner massiven Parallelität (einhundert

Billionen Synapsen, die potenziell alle gleichzeitig arbeiten), doch die Schaltfrequenz seiner Verbindungen ist im Vergleich mit moderner Elektronik extrem niedrig.

28. Siehe Anmerkungen 20 und 21 in **Kapitel 2**.
29. Eine mathematische Analyse des exponentiellen Wachstums von Informationstechnik am Beispiel vom Verhältnis Preis zu Rechenleistung findet sich im Anhang „Ein zweiter Blick auf das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs“.
30. In einem 1950 in der Zeitschrift *Mind: A Quarterly Review of Psychology and Philosophy* veröffentlichten Artikel stellt der theoretische Informatiker Alan Turing die berühmten Fragen: „Können Maschinen denken? Wie können wir einen denkenden Computer erkennen?“ Die Antwort auf letztere Frage ist der Turing-Test. Nach den aktuellen Regeln wird ein Kandidat von einem Experten-Gremium per Chat zu allen möglichen Themen (Liebe, Tagesgeschehen, Mathematik, Philosophie und persönlicher Hintergrund) befragt um festzustellen, ob es sich um Mensch oder Maschine handelt. Der Turing-Test ist als Maßstab für *menschliche* Intelligenz gedacht; ein negatives Ergebnis bedeutet nicht einen generellen Mangel an Intelligenz. Der ursprüngliche Artikel ist verfügbar unter <http://www.abelard.org/turpap/turpap.htm>; eine Besprechung des Tests findet sich in der *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/turing-test>.

Es existieren weder eine Reihe von Tricks noch Algorithmen, die es einer Maschine erlauben würden einen richtig gestalteten Turing-Test zu bestehen, ohne wirklich über Intelligenz auf vollem menschlichem Niveau zu verfügen. Siehe auch Ray Kurzweil, „A Wager on the Turing Test: Why I Think I Will Win“, <http://www.KurzweilAI.net/turingwin>.

31. Siehe John H. Byrne, „Propagation of the Action Potential“, Neuroscience Online, <https://oac22.hsc.uth.tmc.edu/courses/nba/s1/i3-1.html>: „Die

Übertragungsgeschwindigkeit von Aktionspotenzialen in Nervenbahnen variiert zwischen 100 Metern pro Sekunde und weniger als einem zehntel Meter pro Sekunde.“

Siehe auch Kenneth R. Koehler, „The Action Potential“, <http://www.rwc.uc.edu/koehler/biophys/4d.html>: „Die Übertragungsgeschwindigkeit bei Säugetieren beträgt in Motoneuronen 10–120 m/s, dagegen etwa 5–25 m/s in nicht myelinisierten Nervenzellen. (Nicht myelinisierte Nervenzellen feuern durchgehend, ohne Sprünge; die Ionenabgabe ermöglicht zwar einen geschlossenen Kreislauf, verlangsamt jedoch die Übertragungsgeschwindigkeit).

32. Eine 2002 in *Science* veröffentlichte Studie verdeutlicht die Bedeutung des Proteins Beta-Catenin für die horizontale Ausdehnung der menschlichen Großhirnrinde. Das Protein spielt eine entscheidende Rolle für Entstehung von Falten und Furchen in der Großhirnrinde, welche die Gesamtfläche dieser Hirnregion vergrößern und Platz für mehr Nervenzellen schaffen. Mäuse mit erhöhter Beta-Catenin-Produktion entwickelten runzelige, gefaltete Hirnrinden mit deutlich mehr Oberfläche als die flachen, glatten Hirnrinden von gewöhnlichen Mäusen. Anjen Chenn und Christopher Walsh, „Regulation of Cerebral Cortical Size by Control of Cell Cycle Exit in Neural Precursors“, *Science* 297 (Juli 2002): 365–69.

In einem Vergleich von Genexpressionsprofilen in der Großhirnrinde von Menschen, Schimpansen und Rhesusaffen waren nur einundneunzig der Gene, die Unterschiede aufwiesen, am Hirnaufbau beteiligt. Die Autoren der Studie zeigten sich überrascht, dass 90 Prozent der Unterschiede in einer erhöhten Genaktivität beim Menschen bestanden. Siehe M. Cacaes et al., „Elevated Gene Expression Levels Distinguish Human from Non-human Primate Brains“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100.22 (28. Oktober 2003): 13030–35.

Forscher des University of California-Irvine College of Medicine stellten jedoch fest, dass der IQ stärker von der grauen Substanz in

bestimmten Hirnregionen abhängt als von der gesamten Gehirngröße, und dass nur etwa 6 Prozent der grauen Materie des Gehirns im Zusammenhang mit dem IQ stehen. Sie beobachteten außerdem, dass die entscheidenden Regionen über das ganze Gehirn verteilt sind. Ein einzelnes „Intelligenzzentrum“, etwa im Frontallappen, ist demnach unwahrscheinlich. Siehe „Human Intelligence Determined by Volume and Location of Gray Matter Tissue in Brain“, University of California– Irvine news release (19. Juli 2004), http://today.uci.edu/news/release_detail.asp?key=1187.

Eine Studie von 2004 zeigte, dass die Evolution von Genen des Nervensystems beim Menschen im Vergleich zu nicht-menschlichen Primaten beschleunigt ist, und dass Primaten wiederum eine schnellere Evolution aufweisen als andere Säugetiere. Steve Dorus et al., „Accelerated Evolution of Nervous System Genes in the Origin of *Homo sapiens*“, *Cell* 119 (29. Dezember 2004): 1027–40. Bruce Lahm, Leiter der Studie, beschreibt das Ergebnis folgendermaßen: „Der Mensch erlangte seine kognitiven Fähigkeiten nicht durch ein paar zufällige Mutationen, sondern durch eine massive Anzahl von Mutationen, aufgrund einer außerordentlich starken Selektion in Richtung komplexerer kognitiver Fähigkeiten“. Catherine Gianaro, *University of Chicago Chronicle* 24.7 (6. Januar 2005).

Es wird vermutet, dass eine einzige Mutation des Muskelfasergens MYH16 dem Menschen eine deutliche Gehirnzunahme beschert hat: Die Mutation schwächte die frühmenschliche Kaumuskulatur, wodurch die großen Muskelanker überflüssig wurden und Platz für ein größeres Gehirn entstand. Stedman et al., „Myosin Gene Mutation Correlates with Anatomical Changes in the Human Lineage“, *Nature* 428 (25. März 2004): 415–18.

33. Robert A. Freitas Jr., „Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell“, *Artificial Cells, Blood Substitutes, and Immobil. Biotech.* 26 (1998): 411–30; <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Respirocytes.html>; siehe

auch Bilder der Nanomedicine Art Gallery (<http://www.foresight.org/Nanomedicine/Gallery/Species/Respirocytes.html>) und die preisgekrönte Animation über Respirocyten (<http://www.phleschbubble.com/album/beyondhuman/respirocyte01.htm>).

34. Foglets sind ein Konzept des Nanotechnik-Pioniers und Rutgers-Professors J. Storrs Hall. Ein Ausschnitt seiner Beschreibung: „Nanotechnik basiert auf dem Konzept winziger, sich selbst replizierender Roboter. Der Utility Fog (zu deutsch etwa: „Allzwecknebel“) ist eine einfache Weiterführung dieser Idee. Wir stellen uns vor, anstatt Dinge Atom für Atom zusammenzubauen, würden die winzigen Roboter (foglets) ihre Ärmchen ineinander haken und eine feste Substanz in der Form des gewünschten Gegenstandes bilden. Wenn man dann keine Lust mehr auf den avantgardistischen Kaffeetisch hat, rutschen die Roboter einfach ein bisschen herum und fertig ist ein elegantes Möbelstück im Queen-Anne-Stil.“ J. Storrs Hall, „What I Want to Be When I Grow Up, Is a Cloud“, *Extropy*, Quartal 3 und 4, 1994. Veröffentlicht auf KurzweilAI.net, am 6. Juli 2001: <http://www.KurzweilAI.net/foglets>. Siehe auch J. Storrs Hall, „Utility Fog: The Stuff That Dreams Are Made Of“, in *Nanotechnology: Molecular Speculations on Global Abundance*, B. C. Crandall, ed. (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1996). Veröffentlicht auf KurzweilAI.net am 5. Juli 2001: <http://www.KurzweilAI.net/utilityfog>.
35. Sherry Turkle, ed., „Evocative Objects: Things We Think With“, i.E.
36. Siehe das Diagramm „Exponentielles Wachstum der Rechnertechnik“ in Kapitel 2 (Seite 69). Einer Projektion des doppelt exponentiellen Wachstums des Kosten-Nutzen-Verhältnisses von Rechenleistung zufolge erhält man gegen Ende des Jahrhunderts für tausend Dollar 10^{60} Berechnungen pro Sekunde („computations per second“; cps). Wie wir in Kapitel 3 sehen werden, sind – drei verschiedenen Analysen zufolge – etwa 10^{15} cps

nötig um das menschliche Gehirn vollständig zu emulieren. Für eine neuromorphe Simulation (bei welcher die nicht-linearen Eigenheiten jeder einzelnen Synapse nachgestellt werden), braucht man 10^{19} cps. Selbst mit dieser äußerst vorsichtigen Schätzung beträgt die Rechenleistung von 10^{10} Menschen (mehr als es derzeit gibt) 10^{29} cps. Die 10^{60} cps, die wir 2099 für tausend Dollar kaufen können, leisten also soviel wie 10^{31} (zehn Millionen Billionen Billionen) Weltbevölkerungen.

37. Die Erfindung des Kraftstuhls und anderer Textilmaschinen nahm alten englischen Weberfamilien, die ihr Gewerbe über Jahrhunderte hinweg betrieben hatten, mit einem Mal die Lebensgrundlage. Die wirtschaftliche Macht ging von Webern auf Maschineneigentümer über. Die Legende besagt, dass ein schwachsinniger Junge namens Ned Ludd durch reine Schusseligkeit zwei Webemaschinen kaputt machte. Von da an behauptete jeder, der der Sabotage von unter mysteriösen Umständen beschädigtem Fabrikeigentum beschuldigt wurde, einfach: „Ned Ludd war's!“ Die verzweifelten Weber bildeten 1812 eine Geheimgesellschaft, eine Stadtguerilla, bedrohten Fabrikbesitzer, und nicht selten wurden ihre Forderungen erfüllt. Die Antwort auf die Frage nach ihrem Anführer lautete stets: „Na, General Ned Ludd, natürlich!“ Obwohl die Ludditen, wie sie genannt wurden, ihre Gewalt vornehmlich gegen Maschinen richteten, kam es im weiteren Verlauf des Jahres 1812 zu einer Reihe blutiger Auseinandersetzungen. Die Geduld der Tory-Regierung mit den Ludditen hatte ein Ende und die Bewegung endete mit der Verhaftung und dem Erhängen der wichtigsten Mitglieder. Ungeachtet ihres Scheiterns wurden die Ludditen zum Symbol des Widerstands gegen Automatisierung und Technik.

38. Siehe Anmerkung 24.

Kapitel 2: Eine Theorie der technischen Evolution

1. John Smart, Zusammenfassung von „Understanding Evolutionary Development: A Challenge for Futurists“, Präsentation für das Jahrestreffen der World Futurist Society, Washington, D.C., 3. August 2004.
2. Die Ansicht, dass epochale Ereignisse der Evolution sich durch Komplexitätszunahme auszeichnen, vertritt unter anderem Theodore Modis. Siehe Theodore Modis, „Forecasting the Growth of Complexity and Change“, *Technological Forecasting and Social Change* 69.4 (2002), <http://ourworld.compuserve.com/homepages/tmodis/TedWEB.htm>.
3. Kompression spielt eine wichtige Rolle bei der Speicherung von Daten und ihrer Übertragung (z.B. von Musik und Text im Internet). Je kleiner die Datei, desto weniger Platz und Bandbreite belegt sie. Der Mathematiker Claude Shannon, oft gerühmt als Vater der Informationstheorie, definierte die grundlegende Theorie der Datenkompression in „A Mathematical Theory of Communication“, *The Bell System Technical Journal* 27 (Juli–Oktober 1948): 379–423, 623–56. Datenkompression basiert auf Redundanz (Wiederholungen in den Daten) und den unterschiedlichen Häufigkeiten von Zeichenfolgen. In einer Tondatei kann beispielsweise ein Abschnitt absoluter Stille durch einen Wert ersetzt werden, der einfach nur angibt, wie lang der Abschnitt ist. Häufige Buchstabenkombinationen in einer Textdatei können durch kürzere Sequenzen kodiert werden.

Redundanz kann durch verlustfreie Kompression eliminiert werden. Shannon definierte die sogenannte Entropierate als Schranke für verlustfreie Kompression. (Kompression erhöht die „Entropie“ von Daten, also den Anteil echter Information im Gegensatz zu vorbestimmten, vorhersehbaren Datenstrukturen). Kompression entfernt immer Redundanzen, bei verlustfreier Kompression gehen dabei jedoch keine Daten verloren. (Das bedeutet, dass die Daten wieder in den exakten Ausgangszustand verwandelt werden können). Bei verlustbehafteter Kompression dagegen,

beispielsweise von Bilddateien oder Audio- und Videostreams, gehen Informationen unwiderruflich verloren, wobei der Verlust oft nicht wahrnehmbar ist.

Die meisten Kompressionsverfahren verwenden eine Kodierung, welche bestimmte Grundeinheiten (oder Symbole) in der Ausgangsdatei auf ein Code-Alphabet abbildet. Eine Reihe von Leerzeichen in einer Textdatei wird dann beispielsweise durch ein einziges Codewort und die Anzahl einzufügender Leerzeichen ersetzt. Ein Kompressionsalgorithmus findet zunächst eine passende Kodierung und erstellt dann damit eine neue Datei. Die komprimierte Datei ist kleiner als das Original und somit besser speicher- und übertragbar. Die meisten Kompressionsverfahren fallen unter anderem in folgende Kategorien:

- Lauflängenkodierungen ersetzen Sequenzen, die in Wiederholungen eines einzigen Buchstabens bestehen, durch ein Codewort und die Anzahl der Wiederholungen. (Beispiele: Pack-Bits und PCX).
 - Redundanzminimierung oder Entropiekodierung wählt Codewörter anhand von Häufigkeiten und weist der häufigsten Einheit den kürzesten Code zu. (Beispiele: Huffman-Code, arithmetische Kodierung).
 - Stringersatzverfahren kodieren wiederkehrende Muster anhand eines dynamischen, sich im Verlauf der Komprimierung verändernden Wörterbuchs. (Beispiele: Lempel-Ziv, Lempel-Ziv-Welch und DEFLATE).
 - Bei einer Blocksortierungskompression werden die Buchstaben zunächst permutiert, um eine Lauflängenkodierung zu begünstigen. (Beispiel: Burrows-Wheeler-Transformation).
 - Abschätzung durch Teilkodierung, wobei anhand der bereits kodierten Symbole abgeschätzt wird, wie oft das nächste zu kodierende Symbol vorkommt.
4. Murray Gell-Mann, „What Is Complexity?“ in *Complexity*, Bd. 1 (New York: John Wiley and Sons, 1995).

5. Das menschliche Genom hat etwa sechs Milliarden (rund 10^{10}) Bits, ohne Berücksichtigung von Komprimierbarkeit. Der Informationsgehalt von einem Kilogramm Stein ist mit theoretischen 10^{27} Bits somit um einen Faktor 10^{17} größer. Zum Thema Genomkompression, siehe Anmerkung 57.
6. Natürlich besteht auch ein Mensch aus einer Unmenge von Partikeln, und wenn wir die Eigenschaften jedes einzelnen Teilchens betrachten, so enthält ein Mensch ähnlich viele Informationen wie ein Stein gleichen Gewichts. Doch genau wie beim Stein wird der größte Teil dieser Informationen nicht benötigt, um eine Person zu beschreiben.
7. Siehe Anmerkung 175 in **Kapitel 5** für eine algorithmische Beschreibung eines genetischen Algorithmus.
8. In die biologische Kategorie der Menschenaffen oder Hominiden (Familie *Hominidae*) zählen heute Menschen, Schimpansen, Gorillas und Orang-Utans. Der menschliche Zweig spaltete sich vermutlich vor fünf bis sieben Millionen Jahren von seiner Affenverwandtschaft ab. Die Gattung des Menschen innerhalb der *Hominidae* lautet *Homo* und umfasst ausgestorbene Spezies wie den *Homo erectus* und den modernen Menschen (*Homo sapiens*).

Die Finger von Schimpansen sind viel länger und krummer als menschliche. Ihr Daumen ist dagegen schwächer, kürzer und nicht so beweglich. Sie können kleine Gegenstände nicht fest greifen, da Daumen und Zeigefinger nicht überlappen. Der moderne Mensch verfügt über einen längeren Daumen, und seine Finger lassen sich in Richtung einer zentralen Achse anwinkeln, sodass alle Fingerspitzen auf die Daumenspitze treffen. Man spricht von vollständiger Opponierbarkeit. Diese und andere Veränderungen statteten den Menschen mit zwei neuen Greifmethoden aus: einem Präzisionsgriff und einem kraftvollen, festen Griff. Selbst vormenschliche Hominiden, wie die *Australopithecine* Lucy, die vor vermutlich etwa drei Millionen Jahren in Äthiopien lebte, konnten schnell und gezielt mit Steinen werfen. Seitdem haben sich, nach Meinung der

Experten, die Fähigkeiten, mit den Händen zu greifen und zuzuschlagen, kontinuierlich weiterentwickelt, was – neben anderen Veränderungen – unseren Vorfahren entscheidende Vorteile gegenüber anderen Tieren ähnlicher Körpergröße verschaffte. Siehe Richard Young, „Evolution of the Human Hand: The Role of Throwing and Clubbing“, *Journal of Anatomy* 202 (2003): 165– 74; Frank Wilson, *The Hand: How Its Use Shapes the Brain, Language, and Human Culture* (New York: Pantheon, 1998).

9. Das Santa Fe Institut war Pionier auf dem Gebiet Komplexität und Systementstehung. Eine wichtig Rolle bei der Entwicklung von Prinzipien im Bereich Chaos und Komplexität spielt Stuart Kauffman. Sein Buch *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity* (Oxford: Oxford University Press, 1995) beschäftigt sich mit „den Kräften der Ordnung, die am Rande des Chaos wirken“.

John Tyler Bonner stellt in *Evolution of Complexity by Means of Natural Selection* (Princeton: Princeton University Press, 1988) die Fragen: „Wie entsteht aus einem Ei ein ausgewachsenes Tier? Wie kann es sein, dass sich aus einem Bakterium nach vielen Millionen Jahren ein Elefant entwickelt?“

John Holland – ebenfalls vom Santa Fe Institut – ist ein weiterer führender Experte auf dem jungen Fachgebiet Komplexität. Sein Buch *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1996) enthält eine Reihe seiner Vorlesungen am Santa Fe Institute aus dem Jahre 1994. Siehe auch John H. Holland, *Emergence: From Chaos to Order* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1998) und Mitchell Waldrop, *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos* (New York: Simon & Schuster, 1992).

10. Mit dem zweiten Satz der Thermodynamik lässt sich erklären, warum es keinen perfekten Motor geben kann, der die gesamte Energie umsetzt, die bei der Kraftstoffverbrennung entsteht – ein Teil der Wärme wird unweigerlich an die Umgebung abgegeben.

Aufgrund desselben Naturgesetzes wird Wärme von einer heißen Pfanne in die kalte Luft abgegeben und nicht andersherum. Das Gesetz besagt außerdem, dass in geschlossenen Systemen mit der Zeit die Unordnung zunimmt. Das heißt Ordnung verwandelt sich früher oder später in Unordnung. Zum Beispiel sind die Moleküle in einem Eiswürfel relativ strikt angeordnet. Darum steigt die Entropie (Unordnung) in einer Tasse Eiswürfel, wenn man sie bei Raumtemperatur stehen lässt, und das Eis schmilzt. In einer Tasse Wasser gibt es deutlich mehr mögliche Molekülanordnungen; größere Bewegungsfreiheit bedeutet größere Entropie. Man kann Entropie auch als Vieldeutigkeit von Zuständen interpretieren: Auf je mehr Wegen ein bestimmter Zustand erreicht werden kann, desto vieldeutiger ist er. Ein wirrer Haufen Ziegel ist beispielsweise vieldeutiger als ein sorgfältig aufgeschichteter Stapel.

11. Nach Max More's Ansicht „wird der Fortschritt zusätzlich durch Kreuzung und Kombination verschiedener, voranschreitender Technik beschleunigt“. Max More, „Track 7 Tech Vectors to Take Advantage of Technological Acceleration“, *ManyWorlds*, 1. August 2003.
12. Siehe J. J. Emerson et al., „Extensive Gene Traffic on the Mammalian X Chromosome“, *Science* 303.5657 (23. Januar 2004): 537–40, <http://www3.uta.edu/faculty/betran/science2004.pdf>; Nicholas Wade, „Y Chromosome Depends on Itself to Survive“, *New York Times*, 19. Juni 2003; Bruce T. Lahn and David C. Page, „Four Evolutionary Strata on the Human X Chromosome“, *Science* 286.5441 (29. Oktober 1999): 964–67, [http://inside.wi.mit.edu/page/Site/Page%20PDFs/Lahn and Page strata 1999.pdf](http://inside.wi.mit.edu/page/Site/Page%20PDFs/Lahn%20and%20Page%20strata%201999.pdf).

Interessanterweise ist bei Frauen je ein X-Chromosom abgeschaltet (sogenannte X-Inaktivierung), das heißt, nur die Gene eines der beiden Chromosomen kommen zur Ausprägung. Untersuchungen zeigen, dass in manchen Zellen nur das väterliche und in anderen nur das mütterliche X-Chromosom aktiv ist.

13. Human Genome Project, „Insights Learned from the Sequence“, http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/project/journals/insights.html. Das menschliche Genom wurde vollständig sequenziert. Der größte Teil davon (die früher sogenannte Junk-DNA) kodiert jedoch keine Proteine, weshalb nach wie vor umstritten ist, wie viele Gene in den drei Milliarden Basenpaaren der menschlichen DNS noch zu finden sind. Derzeit geht man von weniger als dreißigtausend aus, dabei beliefen sich Schätzungen während des Human Genome Project teilweise noch auf über hunderttausend. Siehe „How Many Genes Are in the Human Genome?“ (http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/faq/genenumber.shtml) und Elizabeth Pennisi, „A Low Number Wins the GeneSweep Pool“, *Science* 300.5625 (6. Juni 2003): 1484.
14. Diese Theorie wurde 1972 von Niles Eldredge und Stephen Jay Gould vorgestellt (N. Eldredge and S. J. Gould, „Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism“, in T. J. M. Schopf, ed., *Models in Paleobiology* [San Francisco: Freeman, Cooper], S. 82–115). Sie sorgt seither für hitzige Diskussionen unter Paläontologen und Evolutionsbiologen, wird aber allmählich weitgehend akzeptiert. Der Theorie zufolge bleiben Spezies über Millionen von Jahren relativ stabil, worauf dann eine plötzliche Flut von Veränderungen folgt und eine neue Spezies entsteht, während die alte ausstirbt (Eilsabeth Vrba spricht von einem „turnover pulse“). Dieser Prozess hat Auswirkungen im gesamten Ökosystem und betrifft viele unverwandte Arten. Dieses von Eldrege und Gould vertretene Entwicklungsschema erfordert ein Umdenken in der Wissenschaft: „Denn die größte Verfälschung, die man Daten antun kann, ist, sie komplett außer Acht zu lassen – und Stagnation wurde stets als Abwesenheit von Evolution verstanden und daher nie thematisiert. Wie seltsam, das häufigste aller paläontologischen Phänomene als uninteressant abzutun!“ S. J. Gould and N. Eldredge, „Punctuated Equilibrium Comes of Age“, *Nature* 366 (18. November 1993): 223–27.

Siehe auch K. Sneppen et al., „Evolution As a Self-Organized Critical Phenomenon“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 92.11 (23. Mai 1995): 5209–13; Elisabeth S. Vrba, „Environment and Evolution: Alternative Causes of the Temporal Distribution of Evolutionary Events“, *South African Journal of Science* 81 (1985): 229–36.

15. In **Kapitel 6** besprechen wir, dass sich, sofern die Lichtgeschwindigkeit kein festes Limit der Informationsübertragung darstellt, Intelligenz und Berechnung exponentiell ausbreiten werden, bis sie die gesamte verfügbare Materie und Energie des Universums erfüllen.
16. Natürliche Evolution bleibt auch insofern relevant für den Menschen, als dass pathogene Prozesse, wie Krebs oder Viruserkrankungen, Evolution gegen uns einsetzen (indem sie Resistenzen gegen unsere Gegenmaßnahmen, beispielsweise Chemotherapie und Virostatika, entwickeln). Wir können jedoch unsere Intelligenz benutzen, um die biologische Evolution auszutricksen, indem wir pathogene Prozesse bei den Wurzeln packen und Krankheiten durch „Cocktails“ aus mehreren orthogonalen (unabhängigen) Therapiemethoden bekämpfen.
17. Andrew Odlyzko, „Internet Pricing and the History of Communications“, AT&T Labs Research, rev. ed., 8. Februar 2001, <http://www.dtc.umn.edu/~odlyzko/doc/history.communications1b.pdf>.
18. Cellular Telecommunications and Internet Association, Semi-Annual Wireless Industry Survey, Juni 2004, http://www.ctia.org/research_statistics/index.cfm/AID/10030.
19. Elektrizität, Telefon, Radio, Fernsehen, Mobiltelefonie: FCC, [www.fcc.gov/Bureaus/Common Carrier/Notices/2000/fc00057a.xls](http://www.fcc.gov/Bureaus/Common_Carrier/Notices/2000/fc00057a.xls). Heimcomputer und Internet: Eric C. Newburger, U.S.Census Bureau, „Home Computers and Internet Use in the United States: August 2000“ (September 2001),

<http://www.census.gov/prod/2001pubs/p23-207.pdf>. Siehe auch „The Millennium Notebook“, *Newsweek*, 13. April 1998, S. 14.

20. Die Paradigmenwechselrate, gemessen an der Verbreitungsdauer neuer Formen der Kommunikationstechnik, verdoppelt sich derzeit jährlich. (Das heißt die Zeitspanne, bis eine neue Technik durch ein Viertel der U.S.-Bevölkerung benutzt wird, halbiert sich alle neun Jahre).
21. Das Diagramm „Zeit bis zur Verbreitung von Erfindungen“ auf **Seite 49** zeigt, dass die Zeit bis zur Verbreitung bei 25 Prozent der U.S.-Bevölkerung über die letzten 130 Jahre kontinuierlich abgenommen hat. Beim Telefon betrug der Zeitraum 35 Jahre, beim Radio dagegen 31 Jahre – eine Abnahme um 11 Prozent; oder 0,58 Prozent pro Jahr während der 21 Jahre zwischen den beiden Erfindungen. Zwischen Radio und Fernseher nahm die Verbreitungszeit jährlich um 0,60 Prozent ab, zwischen Fernseher und PC um 1,0 Prozent, zwischen PC und Mobiltelefon um 2,6 Prozent, und zwischen Mobiltelefon und World Wide Web um 7,4 Prozent pro Jahr. Das Radio verbreitete sich ab 1897 innerhalb von 31 Jahren, das Internet brauchte nur noch 7 Jahren – eine Abnahme um 77 Prozent über 94 Jahre oder um 1,6 pro Jahr. Auf das ganze 20. Jahrhundert extrapoliert ergibt das eine Abnahme von 79 Prozent. Bei der derzeitigen Abnahme der Verbreitungszeit um 7,4 Prozent jährlich wird es nur noch zwanzig Jahre dauern, bis die Verbreitungsdauer um weitere 79 Prozent abnimmt. So betrachtet verdoppelt sich die Paradigmenwechselrate alle 9 Jahre (denn alle 9 Jahre halbiert sich die Verbreitungsdauer). Im Verlauf des 21. Jahrhunderts kommt es also zu elf Verdopplungen, was die Paradigmenwechselrate um Faktor 2^{11} vergrößert, auf ungefähr das 2.000-fache der Rate im Jahr 2000. Die tatsächliche Zunahme wird noch größer ausfallen, da ja auch die Verdopplungsrate weiterhin ansteigt, wie sie es über das gesamte 20. Jahrhundert hinweg getan hat.
22. Daten von 1967–1999, Intel, siehe Gordon E. Moore, „Our Revolution“, <http://www.sia-online.org/downloads/Moore.pdf>. Data

von 2000– 2016, International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) 2002 Update und 2004 Update, <http://public.itrs.net/Files/2002Update/2002Update.pdf> und http://www.itrs.net/Common/2004Update/2004_00_Overview.pdf.

23. Die ITRS DRAM Kosten sind die Herstellungskosten pro Bit. Daten von 1971–2000: VLSI Research Inc. Daten von 2001–2002: ITRS, 2002 Update, Tabelle 7a, Cost-Near-Term Years, S. 172. Daten von 2003– 2018: ITRS, 2004 Update, Tabellen 7a und 7b, Cost-Near-Term Years, S. 20–21.
24. Intel und Dataquest Reports (Dezember 2002), siehe Gordon E. Moore, „Our Revolution“, <http://www.sia-online.org/downloads/Moore.pdf>.
25. Randall Goodall, D. Fandel und H. Huffet, „Long-Term Productivity Mechanisms of the Semiconductor Industry“, Ninth International Symposium on Silicon Materials Science and Technology, 12. –17. Mai 2002, Philadelphia, mit Unterstützung der Electrochemical Society (ECS) und International Sematech.
26. Daten von 1976–1999: E. R. Berndt, E. R. Dulberger und N. J. Rappaport, „Price and Quality of Desktop and Mobile Personal Computers: A Quarter Century of History“, 17. Juli 2000, <http://www.nber.org/~confer/2000/si2000/berndt.pdf>. Daten von 2001–2016: ITRS, 2002 Update, On-Chip Local Clock in Tabelle 4c: Performance and Package Chips: Frequency On-Chip Wiring Levels-Near-Term Years, S. 167.
27. Siehe Anmerkung 26 für Taktung und Anmerkung 24 für Kosten pro Transistor.
28. Intel Transistoren auf Mikroprozessoren: Microprocessor Quick Reference Guide, Intel Research, <http://www.intel.com/pressroom/kits/quickrefyr.htm>. Siehe auch Silicon Research Areas, Intel Research, <http://www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm>.

- Daten von Intel Corporation. Siehe auch Gordon Moore, „No
29. Exponential Is Forever ... but We Can Delay ,Forever‘,, präsentiert
bei der International Solid State Circuits Conference (ISSCC), 10.
Februar 2003, ftp://download.intel.com/research/silicon/Gordon_Moore_ISSCC_021003.pdf.
30. Steve Cullen, „Semiconductor Industry Outlook“, InStat/MDR,
Report Nr. IN0401550SI, April 2004,
<http://www.instat.com/abstract.asp?id=68&SKU=IN0401550SI>.
31. World Semiconductor Trade Statistics, <http://wsts.www5.kcom.at>.
32. Bureau of Economic Analysis, U.S. Department of Commerce,
<http://www.bea.gov/bea/dn/home/gdp.htm>.
33. Siehe Anmerkungen 22–24 und 26–30.
34. International Technology Roadmap for Semiconductors, 2002
update, International Sematech.
35. „25 Years of Computer History“,
<http://www.compros.com/timeline.html>; Linley Gwennap, „Birth of
a Chip“, *BYTE* (Dezember 1996),
<http://www.byte.com/art/9612/sec6/art2.htm>; „The CDC 6000 Series
Computer“,
<http://www.moorecad.com/standardpascal/cdc6400.html>; „A
Chronology of Computer History“,
<http://www.cyberstreet.com/lhcs/museum/chron.htm>; Mark Brader,
„A Chronology of Digital Computing Machines (to 1952)“,
<http://www.davros.org/misc/chronology.html>; Karl Kempf,
„Electronic Computers Within the Ordnance Corps“, November
1961, <http://ftp.arl.mil/~mike/comphist/61ordnance/index.html>; Ken
Polsson, „Chronology of Personal Computers“,
<http://www.islandnet.com/~kpolsson/comphist>; „The History of
Computing at Los Alamos“,
<http://bang.lanl.gov/video/sunedu/computer/comphist.html>
(Passwort benötigt); der Machine Room, <http://www.machine-room.org>; Mind Machine Web Museum,

<http://www.userwww.sfsu.edu/~hl/mmm.html>; Hans Moravec, Computer Daten, <http://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/book97/ch3/processor.list>; „PC Magazine Online: Fifteen Years of PC Magazine“, <http://www.pcmag.com/article2/0,1759,23390,00.asp>; Stan Augarten, *Bit by Bit: An Illustrated History of Computers* (New York: Ticknor and Fields, 1984); International Association of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), *Annals of the History of the Computer* 9.2 (1987): 150–53 und 16.3 (1994): 20; Hans Moravec, *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1988); Rene Moreau, *The Computer Comes of Age* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1984).

36. Bei den der Einfachheit halber als „logarithmisch“ bezeichneten Diagrammen handelt es sich streng genommen um semilogarithmische, da jeweils eine Achse einen logarithmischen, die andere aber einen linearen Maßstab hat.
37. Der Anhang „Ein zweiter Blick auf das Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs“ enthält eine mathematische Herleitung des doppelt exponentiellen Wachstums (also des exponentiellen Wachstums der exponentiellen Wachstumsrate) von Rechenleistung in MIPS pro Stückpreis.
38. Hans Moravec, „When Will Computer Hardware Match the Human Brain?“ *Journal of Evolution and Technology* 1 (1998), <http://www.jetpress.org/volume1/moravec.pdf>.
39. Siehe Anmerkung 35.
40. Eine MIPS für 1.000 \$ zu erreichen, dauerte von 1900 bis 1990. Mittlerweile verdoppeln wir die Anzahl von MIPS pro 1.000 \$ etwa alle 400 Tage. Da wir derzeit bei etwa 2.000 MIPS pro 1.000 \$ sind, steigt das Preis-Leistungs-Verhältnis momentan um 5 MIPS pro Tag beziehungsweise 1 MIPS in fünf Stunden.

41. „IBM Details Blue Gene Supercomputer“, *CNET News*, 8. Mai 2003, http://news.com.com/2100-1008_3-1000421.html.
42. Siehe Alfred North Whitehead, *An Introduction to Mathematics* (London: Williams and Norgate, 1911). Als Whitehead dieses Buch schrieb, arbeitete er zugleich mit Bertrand Russell an den dreibändigen *Principia Mathematica*.
43. Ursprünglich über fünfzehn Jahre geplant, „wurde das Human Genome Project eineinhalb Jahre früher abgeschlossen und lag mit 2,7 Milliarden Dollar (nach dem Kurs von 1991) deutlich unter dem ursprünglich veranschlagten Budget“. http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/project/50yr/press4_2003.shtml.
44. Human Genome Project Information, http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/project/privatesector.shtml; Stanford Genome Technology Center, <http://sequence-www.stanford.edu/group/techdev/auto.html>; National Human Genome Research Institute, <http://www.genome.gov>; Tabitha Powledge, „How Many Genomes Are Enough?“ *Scientist*, 17. November 2003, <http://www.biomedcentral.com/news/20031117/07>.
45. Daten des National Center for Biotechnology Information, „GenBank Statistics“, rev. 4. Mai 2004, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Genbank/genbankstats.html>.
46. Das Schwere Akute Respiratorische Syndrom (SARS) wurde nach seiner Entdeckung innerhalb von einunddreißig Tagen sequenziert – durch die British Columbia Cancer Agency und die American Centers for Disease Control (CDC). Die Sequenzierungen der beiden Institute wichen in nur zehn von neunundzwanzigtausend Basenpaaren voneinander ab. Als Resultat konnte SARS als Coronavirus identifiziert werden. Dr. Julie Gerberding, die Leiterin des CDC, nannte die schnelle Sequenzierung „eine, wie ich glaube, in unserer Geschichte beispiellose wissenschaftliche Leistung“.

Siehe K. Philipkoski, „SARS Gene Sequence Unveiled“, *Wired News*, 15. April 2003, http://www.wired.com/news/medtech/0,1286,58481.00.html?tw=wn_story_related.

Die Bemühungen um die Sequenz des HIV begann dagegen in den 1980ern – HIV 1 und HIV 2 waren erst 2003 beziehungsweise 2002 vollständig sequenziert. National Center for Biotechnology Information, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genomes/framik.cgi?db=genome&gi=12171>; HIV Sequence Database des Los Alamos National Laboratory, <http://www.hiv.lanl.gov/content/hiv-db/HTML/outline.html>.

47. Mark Brader, „A Chronology of Digital Computing Machines (to 1952)“, <http://www.davros.org/misc/chronology.html>; Richard E. Matick, *Computer Storage Systems and Technology* (New York: John Wiley and Sons, 1977); University of Cambridge Computer Laboratory, EDSAC99, <http://www.cl.cam.ac.uk/UoCCL/misc/EDSAC99/statistics.html>; Mary Bellis, „Inventors of the Modern Computer: The History of the UNIVAC Computer—J. Presper Eckert and John Mauchly“, <http://inventors.about.com/library/weekly/aa062398.htm>; „Initial Date of Operation of Computing Systems in the USA (1950–1958)“, zusammengestellt anhand von OECD-Daten von 1968, <http://members.iinet.net.au/~dgreen/timeline.html>; Douglas Jones, „Frequently Asked Questions about the DEC PDP-8 computer“, ftp://rtfrn.mit.edu/pub/usenet/alt.sys.pdp8/PDP-8_Frequently_Asked_Questions_%28posted_every_other_month%29; *Programmed Data Processor-1 Handbook*, Digital Equipment Corporation (1960–1963), <http://www.dbit.com/greeng3/pdp1/pdp1.html#INTRODUCTION>; John Walker, „Typical UNIVAC® 1108 Prices: 1968“, <http://www.fourmilab.ch/documents/univac/config1108.html>; Jack Harper, „LISP 1.5 for the Univac 1100 Mainframe“, <http://www.frobenius.com/univac.htm>; Wikipedia, „Data General

Nova“, <http://www.answers.com/topic/data-general-nova>; Darren Brewer, „Chronology of Personal Computers 1972–1974“, http://uk.geocities.com/magoos_universe/comp1972.htm; www.pricewatch.com; <http://www.jc-news.com/parse.cgi?news/pricewatch/raw/pw-010702>; <http://www.jc-news.com/parse.cgi?news/pricewatch/raw/pw-020624>; <http://www.pricewatch.com> (11/17/04); http://sharkyextreme.com/guidesIWMPG/article.php/10706_222719_1_2; Anzeigen in *Byte*, September 1975–März 1998; Anzeigen in *PC Computing*, März 1977–April 2000.

48. Seagate, „Products“, <http://www.seagate.com/cda/products/discsales/index>; Anzeigen in *Byte*, 1977–1998; Anzeigen in *PC Computing*, März 1999; Redakteure von Time-Life Books, *Understanding Computers: Memory and Storage*, rev. ed. (New York: Warner Books, 1990); „Historical Notes about the Cost of Hard Drive Storage Space“, <http://www.alts.net/ns1625/winchest.html>; „IBM 305 RAMAC Computer with Disk Drive“, <http://www.cedmagic.com/history/ibm-305-ramac.html>; John C. McCallum, „Disk Drive Prices (1955–2004)“, <http://www.jcmit.com/diskprice.htm>.
49. James DeRose, *The Wireless Data Handbook* (St. Johnsbury, Vt.: Quantum, 1996); First Mile Wireless, <http://www.firstmilewireless.com>; J.B. Miles, „Wireless LANs“, *Government Computer News* 18.28 (30. April 1999), http://www.gcn.com/vo118_no28/guide/514-1.html; *Wireless Week* (14. April 1997), <http://www.wirelessweek.com/toc/4%2F14%2F1997>; Office of Technology Assessment, „Wireless Technologies and the National Information Infrastructure“, September 1995, <http://infoventures.com/emf/federal/ota/ota95-tc.html>; Signal Lake, „Broadband Wireless Network Economics Updat“, 14. Januar 2003, <http://www.signallake.com/publications/broadbandupdate.pdf>;

BridgeWave Communications communication,
<http://www.bridgewave.com/050604.htm>.

50. Internet Software Consortium (<http://www.isc.org>), ISC Domain Survey: Number of Internet Hosts, <http://www.isc.org/ds/host-count-history.html>.
51. Ebd.
52. Der jährliche Datenverkehr wird anhand des Verkehrs auf Internet-Backbones der USA im Dezember des jeweiligen Jahres geschätzt. A. M. Odlyzko, „Internet Traffic Growth: Sources and Implications“, *Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking II*, B. B. Dingel, W. Weiershausen, A. K. Dutta, and K.-I. Sato, Hrsg., Proc. SPIE (The International Society for Optical Engineering) 5247 (2003): 1–15, <http://www.dtc.umn.edu/~odlyzko/doc/oft.internet.growth.pdf>; Werte für 2003–2004 : E-Mail-Korrespondenz mit A. M. Odlyzko.
53. Dave Kristula, „The History of the Internet“ (März 1997, Update August 2001), <http://www.davesite.com/webstation/net-history.shtml>; Robert Zakon, „Hobbes‘ Internet Timeline v8.0“, <http://www.zakon.org/robert/internet/timeline>; *Converge Network Digest*, 5. Dezember 2002, <http://www.convergedigest.com/Daily/daily.asp?vn=v9n229&fecha=December%2005,%202002>; V. Cerf, „Cerf’s Up“, 2004, http://global.mci.com/de/resources/cerfs_up/.
54. H. C. Nathanson et al., „The Resonant Gate Transistor“, *IEEE Transactions on Electron Devices* 14.3 (März 1967): 117–33; Larry J. Hornbeck, „128 x 128 Deformable Mirror Device“, *IEEE Transactions on Electron Devices* 30.5 (April 1983): 539–43; J. Storrs Hall, „Nanocomputers and Reversible Logic“, *Nanotechnology* 5 (Juli 1994): 157–67; V.V.Aristov et al., „A New Approach to Fabrication of Nanostructures“, *Nanotechnology* 6 (April 1995): 35–39; C. Montemagno et al., „Constructing Biological Motor Powered Nanomechanical Devices“,

Nanotechnology 10 (1999): 225–31,
<http://www.foresight.org/Conferences/MNT6/Papers/Montemagno/>;
Celeste Biever, „Tiny ‚Elevator‘ Most Complex Nanomachine Yet“,
NewScientist.com News Service, 18. März 2004,
<http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn4794>.

55. ETC Group, „From Genomes to Atoms: The Big Down“, S. 39,
<http://www.etcgroup.org/documents/TheBigDown.pdf>.
56. Ebd., S. 41.
57. Der Informationsgehalt des Genoms lässt sich zwar nicht genau festlegen, aufgrund der vielen Basenpaarwiederholungen ist er jedoch deutlich kleiner als die unkomprimierte Rohfassung. Im Folgenden sind zwei Ansätze beschrieben, um den Umfang der komprimierten Informationen des Genoms abzuschätzen. Beide Ansätze ergeben, dass dreißig bis hundert Millionen Bytes eine vorsichtige (hohe) Schätzung ist.

1. Der genetische Code des Menschen umfasst drei Milliarden Basenpaare. Jedes Basenpaar kodiert zwei Bits (denn es gibt jeweils vier mögliche Basenpaare), somit enthält das unkomprimierte Genom etwa 800 Millionen Bytes. Nichtkodierende DNS wurde früher als „Junk-DNS“ bezeichnet – heute steht zwar fest, dass sie bei der Genexpression eine wichtige Rolle spielt, sie ist jedoch äußerst ineffizient kodiert und zu großen Teilen redundant, was Kompressionsverfahren ausnutzen können. (Beispielsweise enthält das Genom Hunderttausende identische Kopien sogenannter Alu-Sequenzen).

Da Gendatenbanken in letzter Zeit geradezu explosionsartig wachsen, besteht reges Interesse an Genomkompression. Jüngste Versuche, herkömmliche Kompressionen auf Gendaten anzuwenden, zeigen, dass eine verlustfreie Reduktion der Daten um 90 Prozent realistisch ist: Hisahiko Sato et al., „DNA Data Compression in the Post Genome Era“, *Genome Informatics* 12 (2001): 512–14,

<http://www.jsbi.org/journal/GIW01/GIW01P130.pdf>.

Folglich lässt sich das Genom verlustfrei auf etwa 80 Millionen Bytes komprimieren (also so, dass daraus die komplette 800-Millionen-Byte-Sequenz vollständig rekonstruierbar ist).

Nun kodieren 98 Prozent des Genoms überhaupt keine Proteine. Auch nach einer Standard-Kompression (welche Redundanzen eliminiert) scheint der algorithmische Gehalt der nichtkodierenden Abschnitte relativ gering zu sein. Das heißt, wir können mit viel weniger Bits einen Algorithmus kodieren, der dieselbe Funktion erfüllt. Das Reverse Engineering unseres Genoms steckt jedoch noch in den Kinderschuhen, somit ist nicht absehbar, wieviel zusätzliche Reduktion funktionsäquivalente Algorithmen ermöglichen. Darum gehe ich von 30 bis 100 Millionen Bytes im komprimierten Genom aus – die Obergrenze

entspricht dabei einer reinen Datenkompression, ohne algorithmische Vereinfachung.

Der Bauplan für unser Gehirn macht nur einen Teil – allerdings einen großen – dieser Informationen aus.

2. Eine andere Argumentation lautet wie folgt. Obwohl das menschliche Genom drei Millionen Basenpaare enthält, kodiert – wie schon erwähnt – nur ein kleiner Prozentsatz davon Eiweiße. Nach derzeitigen Schätzungen gibt es 26.000 Gene, die Proteine kodieren. Wenn wir für diese Gene eine durchschnittliche Länge von 3.000 Basenpaaren annehmen, so ergibt das insgesamt 78 Millionen Basenpaare beziehungsweise 20 Millionen Bytes (zwei Bits pro Basenpaar). In der Protein-kodierenden Region eines Gens steht jedes „Wort“ (Kodon) aus drei DNS-Basenpaaren für eine bestimmte Aminosäure. Es gibt also 4^3 (64) mögliche Kodons – allerdings nur 20 verschiedene Aminosäuren plus ein Stop-Kodon. Darum fungieren die 43 überzähligen Kodons als Synonyme für die 21 anderen. Während 6 Bits nötig sind um 64 verschiedene Zustände zu kodieren, braucht man für 21 Möglichkeiten nur etwa 4,4 ($=\log_2 21$) Bits. 1,6 von 6 Bits (27 Prozent) ließen sich also einsparen – womit wir bei insgesamt nur noch 15 Millionen Bytes sind. Zusätzlich können auch hier noch redundante Sequenzen durch Kompression eliminiert werden, allerdings deutlich weniger als in der hochredundanten Junk-DNS. Vermutlich kommen wir jedoch unter 12 Millionen Bytes. Dazu müssen wir noch die in den nichtkodierenden DNS-Abschnitten enthaltenen Informationen zur Genexpression addieren. Diese Abschnitte machen zwar den größten Teil des Genoms aus, sind jedoch – wie gesagt – von geringem Informationsgehalt und massiv redundant. Unter der Annahme, dass ihre Informationen sich auf weitere 12 Millionen Bytes belaufen, landen wir bei 24 Millionen Bytes insgesamt. So betrachtet sind 30 bis 100 Millionen Bytes äußerst vorsichtig geschätzt.

58. Reale Zahlen sind mit beliebiger Genauigkeit durch Fließkommazahlen darstellbar. Eine Fließkommazahl besteht in zwei Bitfolgen: Die erste Sequenz kodiert den Exponenten einer Zweierpotenz; die zweite Sequenz, die „Basis“, kodiert eine Zahl zwischen null und eins. Durch Verlängerung der Basis kann jede beliebige Genauigkeit erreicht werden.
59. Stephen Wolfram, *A New Kind of Science* (Champaign, Ill.: Wolfram Media, 2002).
60. Frühe Arbeiten zu einer digitalen Physik finden sich auch in Frederick W. Kantor, *Information Mechanics* (New York: John Wiley and Sons, 1977). Links zu mehreren von Kantors Veröffentlichungen finden sich unter <http://w3.execnet.com/kantor/pm00.htm> (1997); <http://w3.execnet.com/kantor/1b2p.htm> (1989); und http://w3.execnet.com/kantor/_ipoim.htm (1982). Siehe auch <http://www.kx.com/listbox/k/msg05621.html>.
61. Konrad Zuse, „Rechnender Raum“, *Elektronische Datenverarbeitung*, 1967, Bd. 8, S. 336–44. Zwei Jahre später erschien Zuses Buch über Zelluläre Automaten: *Rechnender Raum, Schriften zur Datenverarbeitung* (Braunschweig, Germany: Friedrich Vieweg & Sohn, 1969). Englische Übersetzung: *Calculating Space*, MIT Technical Translation AZT-70-164GEMIT, Februar 1970. MIT Project MAC, Cambridge, MA 02139. PDF.
62. Edward Fredkin, zitiert in Robert Wright, „Did the Universe Just Happen?“ *Atlantic Monthly*, April 1988, 29–44, <http://digitalphysics.org/Publications/Wri88a/html>.
63. Ebd.
64. Viele von Fredkins Ergebnissen basieren auf einem Berechnungsmodell, das eine Reihe von physikalischen Grundprinzipien widerspiegelt. Siehe Edward Fredkin und Tommaso Toffoli, „Conservative Logic“, *International Journal of Theoretical Physics* 21.3–4 (1982): 219–53

http://www.digitalphilosophy.org/download_documents/ConservativeLogic.pdf. Eine Reihe verwandter Überlegungen zu den physikalischen Grundlagen von Berechnung finden sich außerdem in Norman Margolus, „Physics and Computation“, Ph.D. thesis, MIT/LCS/TR-415, MIT Laboratory for Computer Science, 1988.

65. Norbert Wiener und Ed Fredkins Betrachtungsweise von Information als Grundelement der Physik und anderer Realitätsebenen habe ich bereits in meinem Buch *The Age of Intelligent Machines* (1990) besprochen.

Die Übersetzung der Physik in algorithmische Transformationsregeln hat sich als enorme Herausforderung erwiesen, aber Fredkin lässt sich nicht entmutigen. Wolfram widmete diesem Ziel über die letzten zehn Jahre ebenfalls einen beträchtlichen Teil seiner Arbeit, scheinbar ohne viel Kontakt zu Physikern mit ähnlichen Bestrebungen. Wolframs erklärtes Ziel ist „nicht, ein ultimatives physikalisches Modell zu präsentieren“. In seiner „Note for Physicists“ (die einem Appell gleichkommt) beschreibt er jedoch die „Eigenschaften, die ein solches Modell [seiner Meinung nach] haben muss“. (*A New Kind of Science*, S. 1043–65, <http://www.wolframscience.com/nksonline/page1043c-text>).

In *The Age of Intelligent Machines* diskutiere ich „die Frage, ob das Universum letztendlich analoger oder digitaler Natur ist“ und bemerke: „Indem wir natürliche und künstliche Prozesse tiefer und tiefer ergründen, stellen wir fest, dass die Natur häufig zwischen analogen und digitalen Informationsdarstellungen abwechselt“. Als Beispiel führte ich Klänge an. In unserem Gehirn ist Musik eine digitale Aktivierung von Innenohrnerven, welche auf verschiedene Frequenzbereiche reagieren. In der Luft und in den Lautsprecherkabeln liegt die Musik dagegen analog vor. Auf CDs ist sie wiederum digital gespeichert und wird durch digitale Schaltkreise ausgelesen. Diese beruhen auf analogen Verstärkern in Form von spannungsgesteuerten Transistoren. Diese Transistoren steuern den Fluss von Elektronen, die einerseits abzählbar und somit

digital sind, aber andererseits, auf einer tieferen Ebene, analogen, quantenmechanischen Feldgleichungen entsprechen. Auf einer noch tieferen Ebene vermuten nun Fredkin und Wolfram eine digitale (algorithmische) Grundlage für diese Gleichungen.

Hier gilt es anzumerken, dass wir, sollte sich ein solches Modell in der Physik tatsächlich etablieren, sicherlich wieder versuchen würden, die tieferen Mechanismen zu ergründen, welche den digitalen Rechenprozessen und den Zellulären Automaten zugrunde liegen. Vielleicht stehen hinter den Zellulären Automaten, welche das Universum antreiben, wiederum noch grundlegendere, analoge Phänomene, die wie Transistoren mit Schwellenwerten arbeiten, um digitale Operationen zu ermöglichen. Die Formulierung einer digitalen Physik kann die philosophische Debatte über das ultimative Wesen der Realität daher nicht entscheiden – sie wäre dennoch eine wichtige Errungenschaft.

Wie wahrscheinlich ist also das Gelingen des ganzen Unterfangens? Der Existenzbeweis für ein digitales Physikmodell ist leicht erbracht, da stetige Gleichungen jederzeit in beliebiger Genauigkeit durch diskrete Funktionen auf ganzzahligen Werten ausgedrückt werden können. Auf dieser Tatsache gründet nicht zuletzt der Hauptsatz der Analysis. Allerdings würde ein direktes Übersetzen der Formeln diese deutlich komplizierter machen und somit Einsteins Devise widersprechen, alles „so einfach wie möglich, aber nicht einfacher“ zu machen. Die eigentliche Frage ist daher, ob wir die bekannten Zusammenhänge der Physik mit Hilfe von Zellulären Automaten eleganter ausdrücken können. Ein Kriterium bei der Überprüfung einer physikalischen Theorie ist außerdem, ob sich mit ihr verifizierbare Vorhersagen machen lassen – und zumindest hier gibt es Schwierigkeiten mit einer Theorie auf Grundlage von Zellulären Automaten, zu deren zentralen Eigenschaften ja gehört, dass ihr Verhalten nicht vorhersagbar ist.

Wolfram beschreibt das Universum zunächst als riesiges Netz verknüpfter Knotenpunkte. Diese Knoten existieren, so Wolfram, nicht „räumlich“, denn was wir als Räumlichkeit wahrnehmen, ist

lediglich eine Illusion, die entsteht, wenn Erscheinungen von Knoten zu Knoten durch das Netz übertragen werden. Man kann sich leicht vorstellen, wie die klassische Mechanik (nach Newton) durch ein solches, ausreichend feinmaschiges Netz dargestellt werden kann. Erscheinungen wie „Wellen“ und „Teilchen“, die sich durch den Raum zu bewegen scheinen, wären darin „zelluläre Gleiter“: Muster, die sich mit jedem Taktzyklus ein Stückchen weiter durch das Netz bewegen. Wer mit dem auf Zellulären Automaten basierenden *Game of Life* vertraut ist, kennt das Gleiterphänomen und weiß, dass es zahlreiche derartige Muster gibt, die sich automatisch durch das Netz fortpflanzen. Da sie sich pro Taktzyklus um maximal einen Knoten fortbewegen können, hänge die Lichtgeschwindigkeit demnach einfach von der Taktgeschwindigkeit des überuniversalen Computers ab.

Nach Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie ist Gravitation eine Krümmung des Raumes an sich, als hätte unsere dreidimensionale Welt Beulen und Biegungen in einer unsichtbaren vierten Dimension. Auch das lässt sich problemlos in Wolframs Netzuniversum nachstellen, beispielsweise durch ein vierdimensionales Netz, in dem die Krümmung des Raumes in der vierten Dimension genauso dargestellt ist, wie die Krümmung von normalen Objekten in den ersten drei Dimensionen. Alternativ könnten auch Verdichtungen eines dreidimensionalen Netzes an entsprechenden Stellen die Raumkrümmungen widerspiegeln.

In einem Physikmodell, das auf einem Zellulären Automaten basiert, lässt sich auch erklären, wieso – nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik – die Entropie (Unordnung) im Universum zunimmt: Bei der Übergangsfunktion des zugrunde liegenden Automaten muss es sich um eine Regel der Klasse 4 (siehe Haupttext) handeln, ansonsten wäre das Universum ein sehr öder Ort. Wolframs Hauptaussage über diese Art von Regeln lautet, dass sie (trotz ihrer deterministischen Formulierung) schnell scheinbares Chaos erzeugen – was im Einklang steht mit der

scheinbaren Zufälligkeit Brownscher Molekularbewegungen und mit der Aussage des zweiten Hauptsatzes.

Schwieriger wird es mit der speziellen Relativität. Die klassische Mechanik lässt sich relativ einfach in ein zelluläres Netz übersetzen – doch Newtons Gesetze scheitern an der speziellen Relativität. Wenn man in der Welt der klassischen Mechanik auf einer Straße mit 60 km/h unterwegs ist, und auf den Schienen daneben ein Zug mit 80 km/h fährt, so scheint sich der Zug mit 20 km/h zu entfernen. Wenn wir uns jedoch mit dreiviertel Lichtgeschwindigkeit von der Erde wegbewegen, so entfernt sich das Licht der Erde von uns – gemäß der speziellen Relativitätstheorie – scheinbar immer noch mit voller Lichtgeschwindigkeit. Dementsprechend unterscheidet sich auch die Zeitwahrnehmung von zwei Beobachtern je nach ihrer relativen Geschwindigkeit. Dadurch wird unsere Raum-Knoten-Zuordnung ungleich komplizierter; im Prinzip brauchen wir für jeden Beobachter ein anderes Netz. Zwar könnten wir unser „klassisches“ Netz derselben Transformation unterziehen, wie sie die klassische Mechanik durch die spezielle Relativitätstheorie erfährt, doch ist fraglich, ob das zu einer Vereinfachung führt.

Ein zelluläres Netz als Realitätsmodell ist vielleicht im Zusammenhang mit der Quantenmechanik am reizvollsten: Möglicherweise ließe sich damit die scheinbare Zufälligkeit bestimmter quantenmechanischer Phänomene erklären, etwa die spontane, scheinbar zufällige Entstehung von Partikel-Antipartikel-Paaren. Es könnte sich dabei um dieselbe Art von Zufall handeln, wie sie in Zellulären Automaten der Klasse 4 vorliegen. Das Verhalten solcher Automaten ist zwar exakt vorbestimmt, kann aber nicht vorhergesagt werden (außer durch Simulation des Automaten) und ist somit praktisch zufällig.

Das ist keine neue Idee – sie entspricht der „Verborgene-Variablen-Interpretation“ der Quantenmechanik, welcher zufolge scheinbar zufälliges Verhalten von bestimmten Variablen abhängt, auf die wir keinen Zugriff haben. Diese Interpretation ist durchaus konsistent mit den quantenmechanischen Formeln, sie ist jedoch in

Fachkreisen nicht sehr populär, da sie sehr viele Annahmen erfordert. Ich halte das allerdings für kein sehr gutes Gegenargument, da die Existenz und Funktion des Universums an sich, in genau dieser Form, ebenfalls eine Menge Voraussetzung erfordert – und es ist trotzdem da.

Die große Frage ist, wie kann man eine Theorie mit verborgenen Einflussfaktoren überprüfen? Falls sie auf Prozessen in der Art von Zellulären Automaten basiert, so sind die verborgenen Variablen zwar deterministisch, aber inhärent unberechenbar. Man müsste einen anderen Weg finden, um sie „zum Vorschein“ zu bringen.

Wolframs Modell des Universums bietet möglicherweise eine Erklärung für das Phänomen der Quantenverschränkung und den Kollaps der Wellenfunktion. Durch jenen Kollaps wird ein Partikel im Überlagerungszustand, dessen Eigenschaften (zum Beispiel sein genauer Ort) zunächst scheinbar nicht feststehen, rückwirkend in einen einzigen, deterministischen Zustand überführt. In einem zellulären Netz kann dieser Vorgang als Interaktion des Beobachters mit dem beobachteten Objekt aufgefasst werden: Als Beobachter sind wir ebenfalls zelluläre Gebilde innerhalb des Netzes, und zwei zelluläre Gebilde können nicht interagieren, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen – daraus ergibt sich eine mögliche Erklärungsgrundlage für den Kollaps der Wellenfunktion.

Wolfram schreibt: „In einem Netz-Universum könnte es ganz einfach Verknüpfungen geben, durch welche Partikel verbunden bleiben, auch wenn sie sich (im gewöhnlichen Sinne) räumlich weit voneinander entfernen“. Das wäre eine mögliche Erklärung für jüngste, spektakuläre Experimente, bei denen sich zwei verschränkte Teilchen auch über weite Entfernungen hinweg instantan zu beeinflussen scheinen. Einstein selbst lehnte diese „spukhafte Fernwirkung“ ab, doch die besagten Experimente scheinen sie zu bestätigen.

Naturerscheinungen passen mal besser, mal schlechter in Wolframs Konzeption. Manche seiner Ideen erscheinen sehr elegant, doch wie er in seiner „Note for Physicists“ unmissverständlich klar

macht, bleibt die vollständige Übersetzung der Physik in ein algorithmisches, zelluläres System eine gewaltige Herausforderung.

Wolfram stellt auch philosophische Überlegungen an und „erklärt“ das Scheinphänomen freier Wille dadurch, dass unsere Entscheidungen zwar determiniert, jedoch unvorhersehbar seien: Da der einzige Weg, das Ergebnis eines zellulären Prozesses zu ermitteln, darin besteht, den Prozess ablaufen zu lassen, und kein Simulator schneller laufen kann als das Universum selbst, bestünde keine Möglichkeit menschliche Entscheidungen vorauszuberechnen. Sie stünden zwar von vornherein fest, doch wir könnten sie nie vor ihrer Zeit identifizieren. Doch damit wird Wolfram der Thematik nicht ganz gerecht. Dieses Unvorhersehbarkeitsargument lässt sich auf die meisten physischen Prozesse anwenden, beispielsweise ist nicht absehbar, wo genau ein durch die Luft fallendes Staubkorn landen wird. Hier werden also menschliche Entscheidungen mit der zufälligen Bewegung eines herabschwebenden Staubkorns gleichgesetzt. Das scheint tatsächlich Wolframs Überzeugung zu entsprechen, wenn er erklärt, die Vorgänge im menschlichen Gehirn seien „funktionsäquivalent“ zu turbulenten Strömungen in Flüssigkeiten.

Manche Naturerscheinungen (zum Beispiel Wolken und Küstenlinien) sind durch relativ simple Prozesse (wie Zelluläre Automaten oder Fraktale) geprägt, doch intelligente Erscheinungsmuster (wie das menschliche Gehirn) erfordern einen Evolutionsprozess (oder alternativ das Reverse Engineering des Produktes eines solchen). Intelligenz ist ein exklusives Produkt der Evolution und nach meiner Meinung die größte auf der Welt wirkende „Kraft“, die sich letzten Endes über alle Naturgewalten hinweg setzt.

Um es zusammenzufassen: Wolfram zeichnet in seinen umfangreichen, ambitionierten Ausführungen ein überzeugendes, aber letztlich überzogenes und unvollständiges Bild. Wolfram gehört einer wachsenden Gemeinde von Wissenschaftlern an, die Information – anstelle von Energie und Materie – als Grundbaustein

der Realität ansehen. Wolfram hat zu unserem Verständnis beigetragen, wie die Welt, die wir wahrnehmen, aus Informationsmustern hervorgeht. Ich freue mich darauf, zusammen mit Wolfram und seinen Kollegen das allgegenwärtige Wirken von Algorithmen in der Welt weiter zu ergründen.

Die Unvorhersehbarkeit Zellulärer Automaten der Klasse 4 ist die Erklärung für zumindest einen Teil der scheinbaren Komplexität biologischer Systeme – ein Trick der Natur, der sich auch für unsere Technik als nützlich erweisen kann. Zelluläre Automaten allein können dabei nicht die gesamte Biologie erklären – möglicherweise aber die gesamte Physik. Sollte es Wolfram (oder sonst jemandem) gelingen, die Physik vollständig durch Zelluläre Automaten zu beschreiben, so ist Wolframs Buch ein Teil der Lorbeeren sicher. In jedem Fall halte ich es für einen interessanten ontologischen Beitrag.

66. Regel 110 lautet: Eine Zelle wird genau dann weiß, wenn sie und ihre beiden Nachbarn alle dieselbe Farbe haben oder wenn sie zuvor weiß und ein Nachbar weiß und der andere schwarz war; in allen anderen Fällen wird die Zelle schwarz.
67. Wolfram, *New Kind of Science*, S. 4, <http://www.wolframscience.com/nksonline/page-4-text>.
68. Bestimmte Interpretationen der Quantenmechanik implizieren, dass die Welt nicht deterministischen Regeln folgt, und dass die physikalische Realität auf der Quantenebene inhärent zufällig ist.
69. Wie in Anmerkung 57 besprochen enthält das Genom unkomprimiert etwa sechs Milliarden Bits an Informationen (Größenordnung = 10^{10}) und komprimiert zwischen 30 und 100 Millionen Bytes. Ein Teil davon beschreibt natürlich die anderen Organe, doch selbst wenn wir 100 Millionen Bytes für den Gehirnbauplan veranschlagten, kommen wir auf nur 10^9 Bits. In **Kapitel 3** sehen wir, dass die „exakte Simulation jeder einzelnen neuronalen Verbindung“ einschließlich der „Verknüpfungsmuster

und Neurotransmitterkonzentrationen“ im ausgewachsenen Gehirn 10^{18} (Milliarden Milliarden) Bits umfasst. Das sind etwa eine Milliarde (10^9) Mal mehr Informationen als die genetische Beschreibung des Gehirnaufbaus. Die Komplexitätszunahme rührt von der Selbstorganisation des Gehirns her, welche als Reaktion auf Umwelteinflüsse stattfindet.

70. Siehe auch die Abschnitte „Disdisorder“ und „The Law of Increasing Entropy Versus the Growth of Order“ meines Buches *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence* (New York: Viking, 1999), S. 30–33.
71. Ein Universalcomputer nimmt als Eingabe die Beschreibung eines beliebigen anderen Computers und simuliert diesen. Die Geschwindigkeit der Simulation kann dabei beliebig langsam sein.
72. C. Geoffrey Woods, „Crossing the Midline“, *Science* 304.5676 (4. Juni 2004): 1455–56; Stephen Matthews, „Early Programming of the Hypothalamo-Pituitary-Adrenal Axis“, *Trends in Endocrinology and Metabolism* 13.9 (1. November 2002): 373–80; Justin Crowley and Lawrence Katz, „Early Development of Ocular Dominance Columns“, *Science* 290.5495 (17. November 2000): 1321–24; Anna Penn et al., „Competition in the Retinogeniculate Patterning Driven by Spontaneous Activity“, *Science* 279.5359 (27. März 1998): 2108–12.
73. Die sieben Instruktionen einer Turingmaschine lauten: (1) Speicherbandposition lesen, (2) nach links bewegen, (3) nach rechts bewegen, (4) 0 schreiben, (5), 1 schreiben, (6) zu anderem Befehl springen und (7) Ende.
74. In der vielleicht beeindruckendsten Analyse des Buches zeigt Wolfram, wie eine Turingmaschine mit nur zwei Zuständen und fünf verschiedenen Farben als universelle Turingmaschine dienen kann. Vierzig Jahre lang dachte man, universelle Turingmaschinen benötigten mehr als das. Ebenfalls beeindruckend ist die Demonstration, dass Regel 110 in Kombination mit der richtigen

Software einen Universalcomputer darstellt. Natürlich ist auch ein Universalcomputer wiederum wenig nützlich ohne die richtige Software.

75. Ein NOR-Gatter bildet zwei Eingabezustände A und B auf einen Ausabezustand C ab. C ist genau dann wahr, wenn weder A noch B wahr sind.
76. Siehe Abschnitt „A nor B: The Basis of Intelligence?“ in *The Age of Intelligent Machines* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1990), S. 152–57, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?m=12>.
77. United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, „Regional Road Map Towards an Information Society in Asia and the Pacific“, ST/ESCAP/2283, <http://www.unescap.org/publications/detail.asp?id=771>; Economic and Social Commission for Western Asia, „Regional Profile of the Information Society in Western Asia“, 8. Oktober 2003, <http://www.escwa.org.lb/information/publications/ictd/docs/ictd-03-11-e.pdf>; John Enger, „Asia in the Global Information Economy: The Rise of Region-States, The Role of Telecommunications“, Vortrag bei der International Conference on Satellite and Cable Television in Chinese and Asian Regions, Communication Arts Research Institute, Fu Jen Catholic University, 4.–6. Juni 1996.
78. Siehe „The 3 by 5 Initiative“, Fact Sheet 274, Dezember 2003, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/2003/fs274/en/print.html>.
79. Im Jahre 1998 flossen 76 Prozent aller Risikokapitalinvestitionen in Technologieunternehmen (\$10,1 Milliarden). (PricewaterhouseCoopers news release, „Venture Capital Investments Rise 24 Percent and Set Record at \$14.7 Billion, PricewaterhouseCoopers Finds“, 16. Februar 1999). Im Jahre 1999 waren es 90 Prozent (\$32 Milliarden). (PricewaterhouseCoopers news release, „Venture Funding Explosion Continues: Annual and Quarterly Investment Records Smashed, According to

PricewaterhouseCoopers Money Tree National Survey“, 14. February 2000). Risikokapitalinvestitionen nahmen während der High-Tech-Rezession deutlich ab, doch allein im zweiten Quartal 2003 erhielten Softwareunternehmen fast \$1 Milliarde (Pricewaterhouse-Coopers news release, „Venture Capital Investments Stabilize in Q2 2003“, 29. Juli 2003). 1974 erhielten in den USA zweiundvierzig fertigende Betriebe eine Ausschüttung von Risikokapital von insgesamt \$26.4 Millionen (nach dem Dollarwert von 1974, oder \$81 Millionen nach dem Wert von 1992). Samuel Kortum and Josh Lerner, „Assessing the Contribution of Venture Capital to Innovation“, *RAND Journal of Economics* 31.4 (Winter 2000): 674–92,

http://econ.bu.edu/kortum/rje_Winter'00_Kortum.pdf. Paul Gompers und Josh Lerner schreiben: „Der Risikokapitalfluss begann Mitte der 1970er praktisch bei Null...“, Gompers und Lerner, *The Venture Capital Cycle*, (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1999). Siehe auch Paul Gompers, „Venture Capital“, in B. Espen Eckbo, ed., *Handbook of Corporate Finance: Empirical Corporate Finance*, aus der Reihe Handbooks in Finance (Holland: Elsevier, i.E.), Kapitel 11, 2005, <http://mba.tuck.dartmouth.edu/pages/faculty/espen.eckbo/PDFs/Handbookpdf/CH11-VentureCapital.pdf>.

80. Über die Veränderung der Industrien der „Old Economy“ durch die „New Economy“: Jonathan Rauch, „The New Old Economy: Oil, Computers, and the Reinvention of the Earth“, *Atlantic Monthly*, 3. Januar 2001.
81. U.S. Department of Commerce, Bureau of Economic Analysis (<http://www.bea.doc.gov>), Tabelle 1.1.6 auf: <http://www.bea.doc.gov/bealdn/nipaweb/SelectTable.asp?Selected=N>.
82. U.S. Department of Commerce, Bureau of Economic Analysis, <http://www.bea.doc.gov>. Daten für 1920–1999: Population Estimates Program, Population Division, U.S. Census Bureau, „Historical National Population Estimates: July 1, 1900 to July 1,

1999“,

<http://www.census.gov/popest/archives/1990s/popdockest.txt>; Daten für 2000–2004: <http://www.census.gov/popest/states/tables/NST-EST2004-01.pdf>

83. „The Global Economy: From Recovery to Expansion“, Results from Global Economic Prospects 2005: Trade, Regionalism and Prosperity (Weltbank, 2004), <http://globaloutlook.worldbank.org/globaloutlook/outside/globalgrowth.aspx>; „World Bank: 2004 Economic Growth Lifts Millions from Poverty“, Voice of America News, <http://www.voanews.com/english/2004-11-17-voa41.cfrn>.
84. Mark Bils and Peter Klenow, „The Acceleration in Variety Growth“, *American Economic Review* 91.2 (Mai 2001): 274–80, <http://www.klenow.com/Acceleration.pdf>.
85. Siehe Anmerkungen 84, 86 und 87.
86. U.S. Department of Labor, Bureau of Labor Statistics, Pressemitteilung, 3. Juni 2004. Produktivitätsberichte sind erhältlich auf <http://www.bls.gov/bls/productivity.htm>.
87. Bureau of Labor Statistics, Major Sector Multifactor Productivity Index, Manufacturing Sector: Output per Hour All Persons (1996 = 100), <http://data.bls.gov/PDQ/outside.jsp?survey=mp> (Javaskript erforderlich; Auswahl: „Manufacturing“, „Output Per Hour All Persons“, und Startjahr 1949), oder <http://data.bls.gov/cgi-bin/srgate> (Serie „MPU300001“, „AllYears“, und Format 2).
88. George M. Scalise, Semiconductor Industry Association, in „Luncheon Address: The Industry Perspective on Semiconductors“, *2004 Productivity and Cyclicity in Semiconductors: Trends, Implications, and Questions—Report of a Symposium* (2004) (National Academies Press, 2004), S. 40, <http://www.nap.edu/openbook/0309092744/html/index.html>.

89. Daten von Kurzweil Applied Intelligence, heute Teil von ScanSoft (vormals Kurzweil Computer Products).
90. eMarketer, „E-Business in 2003: How the Internet Is Transforming Companies, Industries, and the Economy—a Review in Numbers“, Februar 2003; „US B2C E-Commerce to Top \$90 Billion in 2003“, 30. April 2003, <http://www.emarketer.com/Article.aspx?1002207>; und „Worldwide B2B E-Commerce to Surpass \$1 Trillion By Year’s End“, 19. März 2003, <http://www.emarketer.com/Article.aspx?1002125>.
91. Die Patente im Diagramm sind laut dem U.S. Patent and Trademark Office „Patente für Erfindungen“, auch bekannt als „utility“-Patente. The U.S. Patent and Trademark Office, Table of Annual U.S. Patent Activity, http://www.uspto.gov/web/offices/ac/ido/oeip/taf/h_counts.htm.
92. Die Verdopplungszeit des Marktanteils der Informationstechnik beträgt dreiundzwanzig Jahre. U.S. Department of Commerce, Economics and Statistics Administration, „The Emerging Digital Economy“, Abbildung 2, <http://www.technology.gov/digeconomy/emerging.htm>
93. Die Verdopplungszeit für Bildungsaufgaben pro Kopf in den USA beträgt dreiundzwanzig Jahre. National Center for Education Statistics, Digest of Education Statistics, 2002, <http://nces.ed.gov/pubs2003/digest02/tables/dt030.asp>.
94. Die Vereinten Nationen schätzen das weltweite Anlagekapital im Jahr 2000 auf insgesamt siebenunddreißig Billionen Dollar. United Nations, „Global Finance Profile“, *Report of the High-Level Panel of Financing for Development*, Juni 2001, <http://www.un.org/reports/financing/profile.htm>.

Wenn wir unsere Erwartungshaltung bezüglich künftiger Wachstumsraten (im Vergleich zu derzeitigen Schätzungen) jährlich um nur zwei Prozent nach oben korrigieren, so sollte sich besagter Wert (unter Annahme des derzeitigen Abzinsfaktors von jährlich 6

Prozent) innerhalb von zwanzig Jahren verdreifachen. Wie der nachfolgende Dialog verdeutlichen soll, bleibt dabei die bei einer derart veränderten Zukunftswahrnehmung zu erwartende Steigerung des Abzinsfaktors allerdings unberücksichtigt.

Kapitel 3: Wann Computer die Rechenkapazität des Menschen erreichen

1. Gordon E. Moore, „Cramming More Components onto Integrated Circuits“, *Electronics* 38.8 (19. April 1965): 114–17, <ftp://download.intel.com/research/silicon/moorespaper.pdf>.
2. Moores ursprüngliche Prognose in besagtem Artikel von 1965 lautete, dass sich die Gesamtzahl der Komponenten jedes Jahr verdoppeln würde. 1975 korrigierte er den Zeitraum auf „alle zwei Jahre“. Das bedeutet jedoch mehr als eine Verdopplung der Preis-Leistung, da die Komponenten auch schneller werden (weil die Übertragungswege der Elektronik kürzer werden). Das Preis-Leistungs-Verhältnis insgesamt (Kosten pro Transistor-Taktzyklus) hat sich daher in Wirklichkeit alle dreizehn Monate halbiert.
3. Paolo Gargini, zitiert in Ann Steffora Mutschler, „Moore’s Law Here to Stay“, *ElectronicsWeekly.com*, 14. Juli 2004, <http://www.electronicsworld.co.uk/articles/article.asp?liArticleID=36829>. Siehe auch Tom Krazit, „Intel Prepares for Next 20 Years of Chip Making“, *Computerworld*, 25. Oktober 2004, <http://www.computerworld.com/hardwaretopics/hardware/story/0,10801,96917,00.html>.
4. Michael Kanellos, „‘High-rise’ Chips Sneak on Market“, *CNET News.com*, 13. Juli 2004, <http://zdnet.com.com/2100-1103-5267738.html>.
5. Benjamin Fulford, „Chipmakers Are Running Out of Room: The Answer Might Lie in 3-D“, *Forbes.com*, 22. Juli 2002,

http://www.forbes.com/forbes/2002/0722/173_print.html.

6. NTT Pressemitteilung, „Three-Dimensional Nanofabrication Using Electron Beam Lithography“, 2. Februar 2004, <http://www.ntt.co.jp/news/news04e/0402/040202.html>.
7. László Forró und Christian Schonenberger, „Carbon Nanotubes, Materials for the Future“, *Europhysics News* 32.3 (2001), <http://www.europhysicsnews.com/full/09/article3/article3.html>. Ein Überblick zum Thema Nanotubes findet sich auch auf <http://www.research.ibm.com/nanoscience/nanotubes.html>
8. Michael Bernstein, Pressemitteilung der American Chemical Society, „High-Speed Nanotube Transistors Could Lead to Better Cell Phones, Faster Computers“, 27. April 2004, http://www.eurekalert.org/pub_releases/2004-04/acs-nt042704.php.
9. Ich gehe davon aus, dass ein Nanoröhren-Transistor nebst zugehörigen Kontakten in einen Zehn-Nanometer-Würfel (also 10^3 Kubiknanometer) passt. (Das Volumen des Transistors selbst ist kleiner). Das ist eine vorsichtige Schätzung, da einschichtige Nanoröhren gerade mal einen Nanometer Durchmesser haben. 1 Zoll = 2,54 Zentimeter = $2,54 \times 10^7$ Nanometer. Also: 1 Kubikzoll = $2,54^3 \times 10^{21} = 1,6 \times 10^{22}$ Kubiknanometer. In einem 1-Zoll-Würfel fänden also $1,6 \times 10^{19}$ Transistoren Platz, genug für 10^{12} (eine Billion) Parallelrechner, wenn ein Rechner 10^7 Transistoren benötigt (was für ein Gerät ausreicht, das deutlich komplexer ist als ein menschliches Gehirn).

Ein Nanoröhren-Computer mit 10^{12} Rechenschritten pro Sekunde (gemäß der Schätzung von Burke) brächte es auf etwa 10^{24} cps. Siehe auch Bernstein, „High-Speed Nanotube Transistors“.

Da die Funktion des menschlichen Gehirns mit geschätzt 10^{16} cps (siehe weiter hinten im Kapitel) reproduziert werden kann, entspricht diese Leistung also 100 Millionen (10^8) Gehirnen. Eine neuromorphe Simulation des Gehirns (bei der die nicht-linearen Eigenschaften jeder einzelnen Nervenzelle simuliert werden)

erfordert 10^{19} cps. Legt man diese – vorsichtigere – Schätzung zugrunde, so reicht der 1-Zoll-Würfel nur noch für einhunderttausend simulierte Gehirne.

10. „Wir haben vor gerade mal vier Jahren das erste Mal eine elektrische Übertragung durch eine Nanoröhre gemessen. Jetzt loten wir gerade aus, was mit einem solchen Molekül alles möglich ist. Im nächsten Schritt müssen wir uns überlegen, wie wir mehrere Elemente zu einer komplexen Schaltung kombinieren.“ – einer der Autoren von: Cees Dekker, von Henk W. Ch. Postma et al., „Carbon Nanotube Single-Electron Transistors at Room Temperature“, *Science* 293.5527 (6. Juli 2001): 76–129, laut Pressemitteilung der American Association for the Advancement of Science, „Nanotransistor Switches with Just One Electron May Be Ideal for Molecular Computers, Science Study Shows“, http://www.eurekalert.org/pub_releases/2001-07/aaft-nsw062901.php
11. Den Forschern von IBM gelang es, ein Problem der Nanoröhren-Herstellung zu lösen. Die Röhren werden durch Erhitzung von Kohlenstoff-Ruß erzeugt – dabei entsteht neben den Transistor-tauglichen Halbleiterröhren eine große Anzahl unbrauchbarer metallischer Röhren. Die Forscher integrierten alle erzeugten Röhren in einen Schaltkreis und zerstörten durch einen Stromstoß die ungewünschten Röhren. Diese Methode ist weit effizienter als eine manuelle Auslese per Rasterkraftmikroskop. Mark K. Anderson, „Mega Steps Toward the Nanochip“, *Wired News*, 27. April 2001, auf <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,43324,00.html>, bzgl. Philip G. Collins, Michael S. Arnold, and Phaedon Avouris, „Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown“, *Science* 292.5517 (27. April 2001): 706–9.
12. „Eine Kohlenstoff-Nanoröhre, die im Atombereich aussieht wie gerollter Hasendraht, ist mehrere zehntausend Mal dünner als ein menschliches Haar, aber bemerkenswert stabil.“ Pressemitteilung der

University of California in Berkeley, „Researchers Create First Ever Integrated Silicon Circuit with Nanotube Transistors“, 5. Januar 2004,

http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2004/01/05_nano.shtml, bzgl. Yu-Chih Tseng et al., „Monolithic Integration of Carbon Nanotube Devices with Silicon MOS Technology“, *Nano Letters* 4.1 (2004): 123–27, <http://pubs.acs.org/cgi-bin/sample.cgi/nalefd/2004/4/i01/pdf/nl0349707.pdf>.

13. R. Colin Johnson, „IBM Nanotubes May Enable Molecular-Scale Chips“, *EETimes*, 26. April 2001, <http://eetimes.com/article/showArticle.jhtml?articleId=10807704>.
14. Avi Aviram and Mark A. Ratner, „Molecular Rectifiers“, *Chemical Physics Letters* (15. November 1974): 277–83, zitiert in Charles M. Lieber, „The Incredible Shrinking Circuit“, *Scientific American* (September 2001), auf <http://www.sciam.com>. Die von Aviram und Ratner beschriebene Ein-Molekül-Diode leitet Strom bevorzugt in eine Richtung.
15. Will Knight, „Single Atom Memory Device Stores Data“, *NewScientist.com*, 10. September 2002, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99992775>, bzgl. R. Bennewitz et al., „Atomic Scale Memory at a Silicon Surface“, *Nanotechnology* 13 (4. Juli 2002): 499–502.
16. Besagter Transistor besteht aus Indiumphosphid und Indiumgalliumarsenid. Presseerklärung der University of Illinois, „Illinois Researchers Create World’s Fastest Transistor – Again“, http://www.eurekalert.org/pub_releases/2003-11/uoi-irc110703.php.
17. Michael R. Diehl et al., „Self-Assembled Deterministic Carbon Nanotube Wiring Networks“, *Angewandte Chemie International Edition* 41.2 (2002): 353–56; C. P. Collier et al., „Electronically Configurable Molecular-Based Logic Gates“, *Science* 285.5426 (Juli 1999): 391–94. Siehe

<http://www.its.caltech.edu/~heathgrp/papers/Paperfiles/2002/diehlangchemint.pdf> und
<http://www.cs.duke.edu/~thl/papers/Heath.Switch.pdf>.

18. Die „Rosetten-Nanoröhren“ der Gruppe aus Purdue enthielten Kohlenstoff, Stickstoff, Wasserstoff und Sauerstoff. Die Rosetten ordnen sich von selbst an, weil sie innen hydrophob und außen hydrophil sind; um ihren Innenbereich vor Wasser zu schützen, stapeln sie sich zu Nanoröhren. „Die physikalischen und chemischen Eigenschaften unserer Rosetten-Nanoröhren können dank eines neuartigen ‚dial-in‘-Verfahrens fast beliebig modifiziert werden“, so der Leiter der Gruppe Hicham Fenniri. R. Colin Johnson, „Purdue Researchers Build Made-to-Order Nanotubes“, *EETimes*, 24. Oktober 2002, <http://www.eetimes.com/article/showArticle.jhtml?articleId=18307660>; H. Fenniri et al., „Entropically Driven Self-Assembly of Multichannel Rosette Nanotubes“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, suppl. 2 (30. April 2002): 6487–92; Pressemitteilung aus Purdue, „Adaptable Nanotubes Make Way for Custom-Built Structures, Wires“, <http://news.ups.purdue.edu/UNS/html4ever/020311.Fenniri.scaffold.html>.
Vergleichbare Arbeiten stammen aus den Niederlanden: Gaia Vince, „Nano-Transistor Self-Assembles Using Biology“, *NewScientist.com*, 20. November 2003, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994406>.
19. Liz Kalaugher, „Lithography Makes a Connection for Nanowire Devices“, 9. Juni 2004, <http://www.nanotechweb.org/articles/news/3/6/6/1>, bzgl. Song Jin et al., „Scalable Interconnection and Integration of Nanowire Devices Without Registration“, *Nano Letters* 4.5 (2004): 915–19.
20. Chao Li et al., „Multilevel Memory Based on Molecular Devices“, *Applied Physics Letters* 84.11 (15. März 2004): 1949–51. Siehe

auch http://www.technologyreview.com/articles/rnb_051304.asp?p=1 und <http://nanolab.usc.edu/PDF%5CAPL84-1949.pdf>.

21. Gary Stix, „Nano Patterning“, *Scientific American* (9. Februar 2004), http://www.sciam.com/print_version.cfm?articleID=000170D6-C99F101E-861F83414B7F0000; Michael Kanellos, „IBM Gets Chip Circuits to Draw Themselves“, CNET News.com, <http://zdnet.com.com/21001103-5114066.html>. Siehe auch http://www.nanopolis.net/news_ind.php?type_id=3.
22. IBM arbeitet an Chips, die sich bei Bedarf selbst modifizieren, beispielsweise ihren Speicher erweitern oder Recheneinheiten hinzufügen. „In Zukunft ist der Chip, den man benutzt, nicht der Chip, den man gekauft hat“, sagte Bernard Meyerson, Chefentwickler, IBM Systems and Technology Group. IBM press release, „IBM Plans Industry’s First Openly Customizable Microprocessor“, <http://www.ibm.com/investor/press/mar-2004/31-03-04-1.phtml>.
23. BBC News, „Nanowire‘ Breakthrough Hailed“, 1. April 2003, <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/2906621.stm>. Veröffentlichung: Thomas Scheibel et al., „Conducting Nanowires Built by Controlled Self-Assembly of Amyloid Fibers and Selective Metal Deposition“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100.8 (15. April 2003): 4527–32, online veröffentlicht am 2. April 2003, <http://www.pnas.org/cgi/content/full/100/8/4527>.
24. Pressemitteilung der Duke University, „Duke Scientists ‚Program‘ DNA Molecules to Self Assemble into Patterned Nanostructures“, http://www.eurekalert.org/pub_releases/2003-09/du-ds092403.php, bzgl. Hao Yan et al., „DNA-Templated Self-Assembly of Protein Arrays and Highly Conductive Nanowires“, *Science* 301.5641 (26. September 2003): 1882–84. Siehe auch http://www.phy.duke.edu/~gleb/Pdf_FILES/DNA_science.pdf.
25. Ebd.

26. Das folgende Beispiel löst das sogenannte Rundreiseproblem. Dabei ist eine Reiseroute über mehrere Städte gesucht, die jede Stadt genau einmal besucht. Nicht alle Städte sind direkt verbunden, was das Problem schwierig macht.

Leonard Adleman von der University of Southern California löste es folgendermaßen:

1. Generiere für jede Stadt einen kurzen DNS-Abschnitt mit einer einzigartigen Sequenz.
2. Repliziere jeden dieser Stränge billionenfach (mittels PCR).
3. Vermische alle Stränge. Die DNS-Abschnitte verknüpfen sich automatisch, wodurch längere Stränge entstehen, die jeweils eine Sequenz von mehreren Städten kodieren. Die Sequenzen sind völlig zufällig und müssen keine korrekten Lösungen darstellen. Aufgrund der riesigen Zahl von Einzelsträngen entsteht jedoch mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit mindestens ein Strang – eher aber Millionen von Strängen –, der die richtige Lösung kodiert.

In den folgenden Schritten werden speziell designte Enzyme eingesetzt, um die Billionen von Strängen zu eliminieren, die falsche Lösungen kodieren, bis nur noch die richtige Lösung übrig bleibt:

4. Zerstöre mithilfe von „Primer“-Molekülen Sequenzen, die nicht mit der gewünschten Ausgangs-Stadt beginnen und mit der Ziel-Stadt enden. Vervielfache die übrigen Stränge wiederum durch PCR.
5. Eliminiere durch Enzymreaktionen Routen, die länger sind als die Gesamtzahl der Städte (also mindestens eine Stadt zweimal durchlaufen).
6. Eliminiere durch Enzymreaktionen alle Sequenzen, die Stadt Nummer 1 nicht enthalten. Wiederhole das für alle Städte. Wiederhole diesen Schritt für alle anderen Städte.

7. Jeder verbleibende DNS-Strang kodiert nun eine richtige Lösung. Erstelle Billionen Kopien per PCR.
8. Ermittle per Elektrophorese die Sequenz der verbliebenen Stränge. Am Ergebnis lässt sich die korrekte Stadtreihenfolge ablesen.

Siehe L. M. Adleman, „Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems“, *Science* 266 (1994): 1021–24.

27. Charles Choi, „DNA Computer Sets Guinness Record“, <http://www.upi.com/view.cfm?StoryID=20030224-045551-7398r>.
Siehe auch Y. Benenson et al., „DNA Molecule Provides a Computing Machine with Both Data and Fuel“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100.5 (4. März 2003): 2191–96, verfügbar unter <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?tool=pubmed&pubmedid=12601148>; Y. Benenson et al., „An Autonomous Molecular Computer for Logical Control of Gene Expression“, *Nature* 429.6990 (27. Mai 2004): 423–29 (online veröffentlicht am 28. April 2004), verfügbar unter <http://www.wisdom.weizmann.ac.il/~udi/ShapiroNature2004.pdf>.
28. Pressemitteilung der Stanford University, „Spintronics‘ Could Enable a New Generation of Electronic Devices, Physicists Say“, http://www.eurekalert.org/pub_releases/2003-08/su-ce080803.php, bzgl. Shuichi Murakami, Naoto Nagaosa und Shou-Cheng Zhang, „Dissipationless Quantum Spin Current at Room Temperature“, *Science* 301.5638 (5. September 2003): 1348–51.
29. Celeste Biever, „Silicon-Based Magnets Boost Spintronics“, *NewScientist.com*, 22. März 2004, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994801>, bzgl. Steve Pearton, „Silicon-Based Spintronics“, *Nature Materials* 3.4 (April 2004): 203–4.

30. Will Knight, „Digital Image Stored in Single Molecule“, NewScientist.com, 1. Dezember 2002, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993129>, bzgl. Anatoly K. Khitrin, Vladimir L. Ermakov und B. M. Fung, „Nuclear Magnetic Resonance Molecular Photography“, *Journal of Chemical Physics* 117.15 (15. Oktober 2002): 6903-6.
31. Reuters, „Processing at the Speed of Light“, *Wired News*, <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,61009,00.html>.
32. Die größte, derzeit faktorisierte Zahl hat laut RSA Security 512 Bits.
33. Stephan Gulde et al., „Implementation of the Deutsch-Iozsa Algorithm on an Ion-Trap Quantum Computer“, *Nature* 421 (2. Januar 2003): 48–50. Siehe <http://heart-c704.uibk.ac.at/Papers/Nature03-Gulde.pdf>.
34. Da sich die Preis-Leistung derzeit jährlich verdoppelt, dauert eine Vertausendfachung zehn Jahre. Da jedoch die Verdopplungszeit (langsam) abnimmt, sind es im Endeffekt nur acht Jahre.
35. Jede weitere Vertausendfachung geht wiederum etwas schneller, siehe vorhergehende Anmerkung.
36. Hans Moravec, „Rise of the Robots“, *Scientific American* (Dezember 1999): 124–35, <http://www.sciam.com> und <http://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/project.archive/robot.papers/1999/SciAm.scan.html>. Moravec ist Professor am Robotics Institute der Carnegie Mellon University. Sein Mobile Robot Laboratory erforscht, wie Kameras, Sonar und andere Sensoren eingesetzt werden können, um Robotern dreidimensionale Wahrnehmung zu ermöglichen. In den 1990ern beschrieb er eine Reihe von Robotergenerationen, die „in gewissem Sinne unsere Nachkommen sind. Ich glaube letztendlich gehen sie ihren eigenen Weg und machen Dinge, die wir uns weder vorstellen noch nachvollziehen können – eben genau wie unsere Kinder“. (Nova-Online-Interview mit Hans Moravec, Oktober 1997, <http://www.pbs.org/wgbh/nova/robots/moravec.html>). Seine Bücher

Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence und *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind* erörtern die Fähigkeiten derzeitiger und künftiger Robotergenerationen.

Anmerkung: Der Autor ist Investor und Vorstandsmitglied von Moravecs Robotik-Firma Seegrid.

37. Anweisungen pro Sekunde (Moravec) und Operationen pro Sekunde sind leicht abweichende Maßeinheiten, jedoch ausreichend ähnlich für unsere Größenordnungsschätzungen. Moravec entwickelte die mathematischen Grundlagen visueller Systeme für Roboter unabhängig von biologischen Modellen, doch im Nachhinein ließen sich Ähnlichkeiten feststellen. Moravec ist es gelungen die besagten Gehirnregionen funktional nachzubilden, daher sind seine Abschätzungen bezüglich des Rechenaufwands eine zuverlässige Informationsquelle.
38. Lloyd Watts, „Event-Driven Simulation of Networks of Spiking Neurons“, 7th Neural Information Processing Systems Foundation Conference, 1993; Lloyd Watts, „The Mode-Coupling Liouville-Green Approximation for a Two-Dimensional Cochlear Model“, *Journal of the Acoustical Society of America* 108.5 (November 2000): 2266–71. Watts ist Begründer der Audience, Inc., einem Unternehmen, das zum Ziel hat, Simulationen auditorischer Gehirnregionen für Klangerarbeitung einzusetzen, beispielsweise für Spracherkennung. Siehe <http://www.lloydwatts.com/neuroscience.shtml>.
Anmerkung: Der Autor ist Berater der Audience, Inc.
39. U.S. Patent Application 20030095667, U.S. Patent and Trademark Office, 22. Mai 2003.
40. Die autarken künstlichen Bauchspeicheldrüsen von Medtronic Mini-Med liefern in klinischen Studien vielversprechende Resultate. Das Unternehmen will die Geräte innerhalb der nächsten fünf Jahre auf den Markt bringen. Medtronic Pressemitteilung, „Medtronic Supports Juvenile Diabetes Research Foundation’s Recognition of

Artificial Pancreas as a Potential ‚Cure‘ for Diabetes“, 23. März 2004, http://www.medtronic.com/newsroom/news_2004323a.html. Die Geräte umfassen einen Glucosesensor, eine Insulinpumpe und eine automatische Rückkopplung zur Kontrolle des Insulinspiegels. (International Hospital Federation, „Progress in Artificial Pancreas Development for Treating Diabetes“, <http://www.hospitalmanagement.net/informer/technology/tech10>). Roche will ebenfalls bis 2007 künstliche Bauchspeicheldrüsen produzieren. Siehe <http://www.roche.com/pages/downloads/science/pdf/rtdcmannh02-6.pdf>.

41. Es gibt eine Reihe von Modellen, die auf der Analyse einzelner Neuronen und neuronaler Verknüpfungen basieren. Tomaso Poggio schreibt: „Eine Betrachtungsweise ist, dass Nervenzellen eher einem Chip mit Tausenden logischen Gattern gleichen als einem einzelnen schwellengesteuerten Element.“ Tomaso Poggio, private Korrespondenz mit Ray Kurzweil, Januar 2005.

Siehe auch T. Poggio and C. Koch, „Synapses That Compute Motion“, *Scientific American* 256 (1987): 46–52.

C. Koch and T. Poggio, „Biophysics of Computational Systems: Neurons, Synapses, and Membranes“, in *Synaptic Function*, G. M. Edelman, W. E. Gall, and W. M. Cowan, eds. (New York: John Wiley and Sons, 1987), S. 637–97.

Das Neuroengineering Research Lab der University of Pennsylvania erstellte Neuronenmodelle und -simulationen durch Reverse Engineering von Gehirnfunktionen auf neuronaler Ebene. Der Leiter des Labors Dr. Leif Finkel: „Momentan erstellen wir ein Modell der Zellstruktur eines kleinen Teils des visuellen Kortex. Es handelt sich um eine sehr detailreiche Computersimulation, die bis zu einer gewissen Genauigkeit die grundlegenden Operationen echter Neuronen nachstellt. [Mein Kollege Kwabena Boahen] hat einen Chip entwickelt, der die Retina akkurat modelliert, und Spikes erzeugt, die sehr genau denen echter Retinae entsprechen.“ Siehe <http://nanodot.org/article.pl?sid=01/12/18/1552221>.

Untersuchungen dieser und anderer Modelle und Simulationen auf neuronaler Ebene weisen darauf hin, dass 10^3 Rechenoperationen pro neuronale Transaktion (das heißt, Signalübertragung und Refraktärzeit eines einzelnen Dendriten) eine vernünftige Obergrenze ist. Die meisten Simulationen kommen mit deutlich weniger aus.

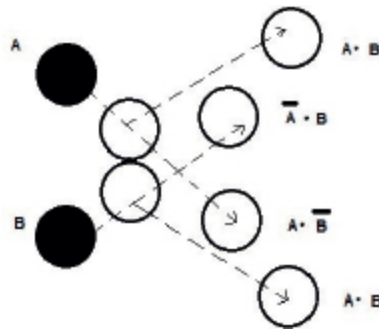
42. Ende 2001 wurden erste Pläne für Blue Gene/L, die zweite Generation von Blue Gene Rechnern, vorgelegt. Der neue Superrechner soll die fünfzehnfache Leistung und nur ein Zwanzigstel der Größe heutiger Superrechner haben. Es handelt sich um ein gemeinsames Projekt des Lawrence Livermore National Laboratory der National Nuclear Security Agency und von IBM. 2002 kündigte IBM an, dass das quelloffene Betriebssystem Linux darauf eingesetzt werden soll. Im Juli 2003 begann die Produktion der innovativen Prozessorchips, die jeweils ein komplettes System enthalten. „Blue Gene/L ist ein Vorzeigekind des system-on-chip-Konzepts. Über 90 Prozent des Chips besteht aus Standardbausteinen unserer Technikbibliothek“ – so Paul Coteus, einer der Projektmanager (Timothy Morgan, „IBM’s Blue Gene/L Shows Off Minimalist Server Design“, *The Four Hundred*, <http://www.midrangeserver.com/tfh/tfh120103-story05.html>). Im Juni 2004 erschien der Blue Gene/L Prototyp erstmals auf der Top-Ten-Liste der Supercomputer. IBM Pressemitteilung, „IBM Surges Past HP to Lead in Global Supercomputing“, <http://www.research.ibm.com/bluegene>.
43. Diese Art von Netz nennt sich „peer-to-peer“, „many-to-many“ oder „multihop“. Darin kann jeder Knoten mit allen oder vielen anderen Knoten verbunden sein und es gibt viele verschiedene Pfade zwischen zwei Knoten. Solche Netze sind anpassungsfähig und selbstorganisiert. „Merkmal eines vermaschten Netzes ist die Abwesenheit einer zentralen Steuerung. Stattdessen ist jeder Knoten mit Funk ausgestattet und dient als Anlaufstelle für alle anderen Knoten.“ Sebastian Rupley, „Wireless: Mesh Networks“, *PC*

Magazine, 1. Juli 2003, <http://www.pcmag.com/article2/0,1759,1139094,00.asp>; Robert Poor, „Wireless Mesh Networks“, *Sensors Online*, Februar 2003, <http://www.sensorsmag.com/articles/0203/38/main.shtml>; Tomas Krag und Sebastian Buettrich, „Wireless Mesh Networking“, O'Reilly Wireless DevCenter, 22. Januar 2004, <http://www.oreillynet.com/pub/a/wirelessl2004/01/22/wirelessmesh.html>.

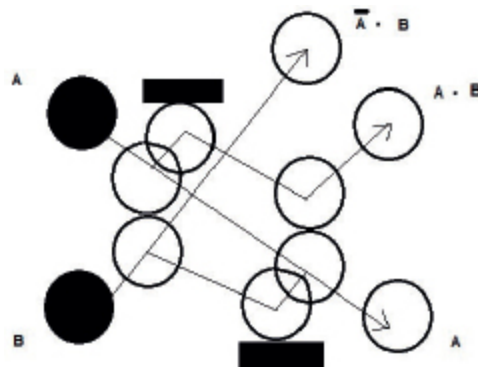
44. Carver Mead, Gründer von mehr als fünfundzwanzig Firmen und Inhaber von mehr als fünfzig Patenten, ist ein Pionier auf dem neuen Gebiet neuromorpher elektronischer Systeme: dem Gehirn und Nervensystem nachempfundene Schaltkreise. Siehe Carver A. Mead, „Neuromorphic Electronic Systems“, *IEEE Proceedings* 78.10 (Oktober 1990): 1629–36. Seine Arbeit ermöglichte das Touchpad und Innenohrchips für digitale Hörgeräte. Sein 1999 gegründetes Startup-Unternehmen Foveon stellt analoge Kamerasensoren her, die einen Fotofilm imitieren.
45. Edward Fredkin, „A Physicist's Model of Computation“, *Proceedings of the Twenty-sixth Recontre de Moriond, Texts of Fundamental Symmetries* (1991): 283–97, http://digitalphilosophy.org/physicists_model.htm.
46. Gene Frantz, „Digital Signal Processing Trends“, *IEEE Micro* 20.6 (November/Dezember 2000): 52–59, <http://csdl.computer.org/comp/mags/mi/2000/06/m6052abs.htm>.
47. Intel kündigte 2004 eine „Kehrtwende“ zu Doppelkernprozessoren (mit mehr als einem Prozessor pro Chip) an, nachdem sie eine „thermal wall“ („thermische Wand“) erreicht hatten, das heißt die Wärmeentwicklung immer schnellerer Einzelchippprozessoren wurde zu groß: <http://www.intel.com/employee/retiree/circuit/righthandturn.htm>.
48. R. Landauer, „Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process“, *IBM Journal of Research Development* 5 (1961): 183–91,

<http://www.research.ibm.com/journal/rd/053/ibmrd0503C.pdf>.

49. Charles H. Bennett, „Logical Reversibility of Computation“, *IBM Journal of Research Development* 17 (1973): 525–32, <http://www.research.ibm.com/journal/rd/176/ibmrd1706G.pdf>;
Charles H. Bennett, „The Thermodynamics of Computation – a Review“, *International Journal of Theoretical Physics* 21 (1982): 905–40; Charles H. Bennett, „Demons, Engines, and the Second Law“, *Scientific American* 257 (November 1987): 108–16.
50. Edward Fredkin und Tommaso Toffoli, „Conservative Logic“, *International Journal of Theoretical Physics* 21 (1982): 219–53, http://digitalphilosophy.org/download_documents/ConservativeLogic.pdf. Edward Fredkin, „A Physicist’s Model of Computation“, *Proceedings of the Twenty-sixth Rencontre de Moriond, Tests of Fundamental Symmetries* (1991): 283–97, http://www.digitalphilosophy.org/physicists_model.htm.
51. Knight, „Digital Image Stored in Single Molecule“, bzgl. Khitrin et al., „Nuclear Magnetic Resonance Molecular Photography“; siehe Anmerkung 30.
52. Zehn Milliarden (10^{10}) Menschen mit je 10^{19} cps macht insgesamt 10^{29} cps für alle menschlichen Gehirne; 10^{41} cps ist um zehn Billionen (10^{13}) größer als dieser Wert.
53. Fredkin, „Physicist’s Model of Computation“; siehe Anmerkung 45 und 50.
54. Zwei Beispiele sind das Interaktionsgatter (ein universelles, reversibles logisches Gatter mit zwei Eingängen und vier Ausgängen)



und das Feynman-Gatter (zwei Eingänge, drei Ausgänge).



55. Ebd., S. 8.
56. C. L. Seitz et al., „Hot-Clock nMOS“, *Proceedings of the 1985 Chapel Hill Conference on VLSI* (Rockville, Md.: Computer Science Press, 1985), S. 1–17, <http://caltechcstr.library.caltech.edu/archive/00000365>; Ralph C. Merkle, „Reversible Electronic Logic Using Switches“, *Nanotechnology* 4 (1993): 21–40; S. G. Younis and T. F. Knight, „Practical Implementation of Charge Recovering Asymptotic Zero Power CMOS“, *Proceedings of the 1993 Symposium on Integrated Systems* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1993), S. 234–50.
57. Hiawatha Bray, „Your Next Battery“, *Boston Globe*, 24. November 2003, http://www.boston.com/business/technology/articles/2003/11/24/your_next_battery.

58. Seth Lloyd, „Ultimate Physical Limits to Computation“, *Nature* 406 (2000): 1047–54.

Zu den ersten Arbeiten über die Grenzen des Rechenpotenzials gehört Hans J. Bremermann, „Optimization Through Evolution and Recombination“, in M. C. Yovits, C. T. Jacobi, c. D. Goldstein, eds., *Self-Organizing Systems* (Washington, DC.: Spartan Books, 1962), S. 93–106.

1984 Robert A. Freitas Jr. führte Bremermanns Arbeit weiter: Robert A. Freitas Jr., „Xenopsychology“, *Analog* 104 (April 1984): 41–53,

<http://www.rfreitas.com/Astro/Xenopsychology.htm#SentienceQuotient>.

59. $\pi \times$ maximale Energie ($10^{17} \text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s}^2$) / ($6,6 \times 10^{-34} \text{ Joulesekunden}$)
= $\sim 5 \times 10^{50}$ Operationen/s.
60. $5 \times 10^{50} \text{ cps}$ entspricht 5×10^{21} (5 Milliarden Billionen) Erdbevölkerungen (jede davon mit 10^{29} cps).
61. Zehn Milliarden (10^{10}) Menschen mit je 10^{16} cps ergibt 10^{26} cps für die gesamte menschliche Zivilisation. $5 \times 10^{50} \text{ cps}$ entsprechen somit 5×10^{24} (5 Billionen Billionen) Zivilisationen.
62. Diese Schätzung geht davon aus, dass während der letzten zehntausend Jahre stets zehn Milliarden Menschen lebten, was natürlich nicht stimmt. Die tatsächliche Bevölkerungszahl ist kontinuierlich gewachsen und erreichte 6,1 Milliarden im Jahr 2000. Ein Jahr hat etwa 3×10^7 Sekunden, zehntausend Jahre haben 3×10^{11} Sekunden. Geht man also von 10^{26} cps für die menschliche Zivilisation aus, so entsprechen der menschlichen Denkleistung der letzten zehntausend Jahre auf keinen Fall mehr als 3×10^{37} Operationen. Der ultimative Laptop schafft 5×10^{50} Operationen pro Sekunde und braucht somit 10^{-13} Sekunden – eine zehntausendstel Nanosekunde – um die Gedanken von zehn Milliarden Menschen über zehntausend Jahre zu simulieren.
63. Anders Sandberg, „The Physics of the Information Processing Superobjects: Daily Life Among the Jupiter Brains“, *Journal of*

Evolution & Technology 5 (22. Dezember 1999),
<http://www.transhumanist.com/volume5/Brains2.pdf>.

64. Siehe Anmerkung 62; 10^{42} cps ist um Faktor 10^{-8} weniger als 10^{50} cps, somit wird die zehntausendstel Nanosekunde zu 10 Mikrosekunden.
65. Eine Liste mit Drexlers Veröffentlichungen und Patenten findet sich unter <http://e-drexler.com/p/04/04/0330drexPubs.html>.
66. Mit $\$10^{12}$ und 10^{26} cps pro tausend Dollar ($\$10^3$) kommen wir Mitte der 2040er auf 10^{35} cps pro Jahr. Das Verhältnis zu den 10^{26} cps aller Gedanken aller Menschen ist eins zu einer Milliarde (10^9).
67. Robert A. Freitas führte 1984 mit dem „sentience quotient“ (SQ; zu deutsch etwa: „Bewusstseinsquotient“) einen logarithmischen Maßstab für die Informationsverarbeitungsfähigkeit eines Systems ein. Auf eine Skala von -70 bis 50 erreicht das menschliche Gehirn 13. Der Supercomputer Cray-1 kommt auf 9. Der Maßstab basiert auf der Menge an Berechnung pro Masse. Allerdings hat auch ein sehr primitiver Computer einen hohen SQ, solange er nur schnell ist. Der von mir beschriebene Maßstab für Rechenleistung baut auf Freitas SQ auf, versucht jedoch zu berücksichtigen, wie sinnvoll Berechnungen sind: Wenn ein einfacherer Berechnungsprozess zu den tatsächlich durchgeführten Berechnungen äquivalent ist, so wird der einfachere Prozess der Effizienzbemessung zugrunde gelegt. Außerdem ist gefordert, dass die Berechnungen „sinnvoll“ sind. Robert A. Freitas Jr., „Xenopsychology“, *Analog* 104 (April 1984): 41–53,
<http://www.rfreitas.comfAstro/Xenopsychology.htm#SentienceQuotient>.
68. Nebenbei bemerkt: Zu den frühen Formen von Datenspeichern gehören tatsächlich kleine, gravierte Steine. Als eine der ersten Schriftformen entwickelte sich 3000 v. Chr. die Keilschrift in Mesopotamien – dabei wurden mittels piktografischer Gravuren Informationen auf Steinen vermerkt. Solche Steine wurden auf einer

Ablagefläche in Reihen und Spalten arrangiert und dienten der Aufzeichnung landwirtschaftlicher Daten – die Tabellenkalkulation war geboren. Ein solches Keilschriftartefakt ziert meine Sammlung historischer Computer.

69. Eintausend (10^3) Bits sind um Faktor 10^{-24} weniger als die theoretische Speicherkapazität aller Atome des Steins (geschätzte 10^{27} Bits).
70. 1 cps (10^0 cps) sind um Faktor 10^{-42} weniger als die theoretische Rechenkapazität aller Atome des Steins (geschätzte 10^{42} cps).
71. Edgar Buckingham, „Jet Propulsion for Airplanes“, NACA report no. 159, in *Ninth Annual Report of NACA-1923* (Washington, D.C.: NACA, 1924), S. 75–90. Siehe <http://naca.larc.nasa.gov/reports/1924/naca-report-159/>
72. Belle Dume, „Microscopy Moves to the Picoscale“, *PhysicsWeb*, 10. Juni 2004, <http://physicsweb.org/article/news/8/6/6,bzgl>. Stefan Hembacher, Franz J. Giessibl und Jochen Mannhart, „Force Microscopy with Light-Atom Probes“, *Science* 305.5682 (16. Juli 2004): 380–83. Dieses von Physikern der Universität Augsburg entwickelte Mikroskop benutzt ein einzelnes Kohlenstoffatom als Messspitze und hat eine dreimal höhere Auflösung als gewöhnliche Rastertunnelmikroskope. Die grobe Funktionsweise: Das oberste Wolframatom des Messobjekts wird zu Schwingungen mit Amplitude unter einem Nanometer angeregt. Durch Interaktion des Wolframatoms mit der Messspitze entsteht ein Sinuswellenmuster mit höheren harmonischen Komponenten. Diese Signale werden gemessen und in eine ultrahochaufgelöste Abbildung des Wolframatoms umgewandelt, auf dem Einzelheiten mit nur 77 Pikometern (tausendstel Nanometer) Durchmesser erkennbar sind.
73. Henry Fountain, „New Detector May Test Heisenberg’s Uncertainty Principle“, *New York Times*, 22. Juli 2003.
74. Mitch Jacoby, „Electron Moves in Attoseconds“, *Chemical and Engineering News* 82.25 (21. Juni 2004): 5, bzgl. Peter Abbamonte

et al., „Imaging Density Disturbances in Water with a 41.3 Attosecond Time Resolution“, *Physical Review Letters* 92.23 (11. Juni 2004): 237–401.

75. S. K. Lamoreaux und J. R. Torgerson, „Neutron Moderation in the Oklo Natural Reactor and the Time Variation of Alpha“, *Physical Review D* 69 (2004): 121701–6, <http://scitation.aip.org/getabs/servlet/Getabs-Servlet?prog=normal&id=PRVDAQ000069000012121701000001&idtype=cvips&gifs=yes>; Eugenie S. Reich, „Speed of Light May Have Changed Recently“, *New Scientist*, 30. Juni 2004, <http://www.newscientist.com!news/news.jsp?id=ns99996092>.
76. Charles Choi, „Computer Program to Send Data Back in Time“, UPI, 1. Oktober 2002, <http://www.upi.com/view.efm?StoryID=20021001-125805-3380r>; Todd Brun, „Computers with Closed Timelike Curves Can Solve Hard Problems“, *Foundation of Physics Letters* 16 (2003): 245–53. Elektronische Ausgabe, 11. September 2002, http://arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/0209/0209061.pdf.

Kapitel 4: Intelligente Software

1. Lloyd Watts, „Visualizing Complexity in the Brain“, in D. Fogel and C. Robinson, eds., *Computational Intelligence: The Experts Speak* (Piscataway, N.J.: IEEE Press/Wiley, 2003), <http://www.lloydwatts.com/wcci.pdf>.
2. J. G. Taylor, B. Horwitz, und K. J. Friston, „The Global Brain: Imaging and Modeling“, *Neural Networks* 13, Sonderausgabe (2000): 827.
3. Neil A. Busis, „Neurosciences on the Internet“, <http://www.neuroguide.com>; „Neuroscientists Have Better Tools on the Brain“, *Bio IT Bulletin*, <http://www.bio->

it.world.com/news/041503_report2345.html; „Brain Projects to Reap Dividends for Neurotech Firms“, *Neurotech Reports*, <http://www.neurotechreports.com/pages/brainprojects.html>.

4. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, Basic Capabilities, Abschnitt 4.8.6, „Noninvasive Neuroelectric Monitoring“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 115–16, <http://www.nanomedicine.com/NMI/4.8.6.htm>.
5. Kapitel 3 behandelt dieses Thema; siehe den Abschnitt „Die Rechenkapazität des menschlichen Gehirns“.
6. Erforschung und Entwicklung von Spracherkennung bei Kurzweil Applied Intelligence, die ich 1982 gründete, heute Teil von ScanSoft (vormals Kurzweil Computer Products).
7. Lloyd Watts, U.S. Patent Application, U.S. Patent and Trademark Office, 20030095667, 22. Mai, 2003, „Computation of Multi-sensor Time Delays.“ Zusammenfassung: „Beschrieben ist die Ermittlung des Zeitabstandes zwischen dem Empfang eines Signals durch einen Sensor und dem Empfang eines zweiten Signals durch einen zweiten Sensor. Das erste Signal wird analysiert um eine Reihe von ersten Signalkanälen unterschiedlicher Frequenz abzuleiten, und das zweite Signal wird analysiert um eine Reihe von zweiten Signalkanälen verschiedener Frequenz abzuleiten. Ein erstes Merkmal wird gefunden, das zu einem ersten Zeitpunkt in einem der ersten Signalkanäle auftritt. Ein zweites Merkmal wird gefunden, das zu einem zweiten Zeitpunkt in einem der zweiten Signalkanäle auftritt. Das erste Merkmal wird dem zweiten Merkmal zugeordnet, und der erste Zeitpunkt wird mit dem zweiten Zeitpunkt verglichen, um den Zeitabstand zu ermitteln.“ Siehe auch Nabil H. Farhat, U.S. Patent Application 20040073415, U.S. Patent and Trademark Office, 15. April 2004, „Dynamical Brain Model for Use in Data Processing Applications.“
8. Ich schätze die komprimierte Genomgröße auf dreißig bis einhundert Millionen Bytes (siehe Anmerkung 57 für Kapitel 2); das

ist kleiner als der Maschinencode von Microsoft Word und sehr viel kleiner als der Quellcode. Siehe Word 2003 system requirements, 20. Oktober 2003, <http://www.microsoft.com/office/word/prodinfo/sysreq.mspx>.

9. Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Epigenetics>.
10. Anmerkung 57 für Kapitel 2 enthält eine Analyse des Informationsgehalts des Genoms, den ich auf dreißig bis einhundert Millionen Bytes und somit auf weniger als 10^9 Bits schätze. Eine Analyse des Informationsgehalts des Gehirns (geschätzt 10^{18} Bits) findet sich im Abschnitt „Menschliche Speicherkapazität“ auf Seite 125.
11. Marie Gustafsson und Christian Balkenius, „Using Semantic Web Techniques for Validation of Cognitive Models against Neuroscientific Data“, AILS04 Workshop, SAIS/SSLS Workshop (Swedish Artificial Intelligence Society; Swedish Society for Learning Systems), 15.–16. April 2004, Lund, Schweden, www.lucs.lu.se/People/Christian.Balkenius/PDF/Gustafsson.Balkenius.2004.pdf.
12. Siehe Kapitel 3. Folgende Referenz beschreibt das Neuron als einem Chip mit Tausenden Logikgattern ähnlich: T. Poggio und C. Koch, „Synapses That Compute Motion“, *Scientific American* 256 (1987): 46–52. Außerdem C. Koch und T. Poggio, „Biophysics of Computational Systems: Neurons, Synapses, and Membranes“, in *Synaptic Function*, G. M. Edelman, W. E. Gall, und W. M. Cowan, eds. (New York: John Wiley and Sons, 1987), S. 637–97.
13. Über Mead: http://www.technology.gov/Medal/2002/bios/Carver_A_Mead.pdf. Carver Mead, *Analog VLSI and Neural Systems* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1986).
14. Anmerkung 172 in Kapitel 5 enthält eine algorithmische Beschreibung eines selbstlernenden neuronalen Netzes; Anmerkung

175 in **Kapitel 5** beschreibt einen selbstorganisierten genetischen Algorithmus.

15. Siehe Gary Dudley et al., „Autonomic Self-Healing Systems in a Cross-Product IT Environment“, proceedings of the IEEE International Conference on Autonomic Computing, New York City, 17.–19. Mai 2004, <http://csdl.computer.org/comp/proceedings/icac/2004/2114/00121140312.pdf>; „About IBM Autonomic Computing“, <http://www-3.ibm.com/autonomic/about.shtml>; sowie Ric Telford, „The Autonomic Computing Architecture“, 14. April 2004, <http://www.dcs.st-andrews.ac.uk/undergrad/current/dates/disclec/2003-2/RicTelfordDistinguished2.pdf>.
16. Christine A. Skarda und Walter J. Freeman, „Chaos and the New Science of the Brain“, *Concepts in Neuroscience* 1.2 (1990): 275–85.
17. C. Geoffrey Woods, „Crossing the Midline“, *Science* 304.5676 (4. Juni 2004): 1455–56; Stephen Matthews, „Early Programming of the Hypothalamo-Pituitary-Adrenal Axis“, *Trends in Endocrinology and Metabolism* 13.9 (1. November 2002): 373–80; Justin Crowley and Lawrence Katz, „Early Development of Ocular Dominance Columns“, *Science* 290.5495 (17. November 2000): 1321–24; Anna Penn et al., „Competition in the Retinogeniculate Patterning Driven by Spontaneous Activity“, *Science* 279.5359 (27. März 1998): 2108–12; M. V. Johnston et al., „Sculpting the Developing Brain“, *Advances in Pediatrics* 48 (2001): 1–38; P. La Cerra und R. Bingham, „The Adaptive Nature of the Human Neurocognitive Architecture: An Alternative Model“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 95 (15. September 1998): 11290–94.
18. Künstliche neuronale Netze sind vereinfachte Modelle von Nervensystemen und können von selbst lernen, Probleme zu lösen. Algorithmische Beschreibung in Anmerkung 172 zu **Kapitel 5**.

Genetische Algorithmen sind Evolutionsmodelle mit sexueller Reproduktion und kontrollierten Mutationsraten. Detaillierte Beschreibung in Anmerkung 175 in **Kapitel 5**. Markovmodelle haben einen mathematischen Hintergrund und ähneln in mancherlei Hinsicht neuronalen Netzen.

19. Aristotle, *The Works of Aristotle*, Übersetz. W. D. Ross (Oxford: Clarendon Press, 1908–1952 (siehe v.a.: *Physics*); siehe auch http://www.encyclopedia.com/html/section/aristotl_philosophy.asp.
20. E. D. Adrian, *The Basis of Sensation: The Action of Sense Organs* (London: Christophers, 1928).
21. A. L. Hodgkin und A. F. Huxley, „Action Potentials Recorded from Inside a Nerve Fibre“, *Nature* 144 (1939): 710–12.
22. A. L. Hodgkin und A. F. Huxley, „A Quantitative Description of Membrane Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve“, *Journal of Physiology* 117 (1952): 500–544.
23. W. S. McCulloch und W. Pitts, „A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity“, *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 (1943): 115–33. Dieses Paper ist ein Klassiker, jedoch schwer verständlich; für eine klare Einführung und Erklärung, siehe „A Computer Model of the Neuron“, the Mind Project, Illinois State University, <http://www.mind.ilstu.edu/curriculum/perception/mpneuron1.html>.
24. Eine algorithmische Beschreibung von neuronalen Netzen findet sich in Anmerkung 172 zu **Kapitel 5**.
25. E. Salinas und P. Thier, „Gain Modulation: A Major Computational Principle of the Central Nervous System“, *Neuron* 27 (2000): 15–21.
26. K. M. O’Craven und R. L. Savoy, „Voluntary Attention Can Modulate fMRI Activity in Human MT/MST“, *Investigational Ophthalmological Vision Science* 36 (1995): S856 (supp.).

- Marvin Minsky und Seymour Papert, *Perceptrons* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1969).
27. Frank Rosenblatt, Cornell Aeronautical Laboratory, „The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain“, *Psychological Review* 65.6 (1958): 386–408; siehe Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Perceptron>.
28. O. Sporns, G. Tononi und G. M. Edelman, „Connectivity and Complexity: The Relationship Between Neuroanatomy and Brain Dynamics“, *Neural Networks* 13.8–9 (2000): 909–22.
29. R. H. Hahnloser et al., „Digital Selection and Analogue Amplification Coexist in a Cortex-Inspired Silicon Circuit“, *Nature* 405.6789 (22. Juni 2000): 947–51; „MIT and Bell Labs Researchers Create Electronic Circuit That Mimics the Brain’s Circuitry“, *MIT News*, 21. Juni 2000, <http://web.mit.edu/newsoffice/nr/2000/machinebrain.html>.
30. Manuel Trajtenberg, *Economic Analysis of Product Innovation: The Case of CT Scanners* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1990); Michael H. Priebe, Ph.D., Präsident, CEO, NEUROMED GmbH; P-M. L. Robitaille, A. M. Abduljalil, und A. Kangarlu, „Ultra High Resolution Imaging of the Human Head at 8 Tesla: 2K x 2K for Y2K“, *Journal of Computer Assisted Tomography* 24.1 (Januar–Februar 2000): 2–8.
31. Seong-Gi Kim, „Progress in Understanding Functional Imaging Signals“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100.7 (1. April 2003): 3550–52, <http://www.pnas.org/cgi/content/full/100/7/3550>. Siehe auch Seong-Gi Kim et al., „Localized Cerebral Blood Flow Response at Submillimeter Columnar Resolution“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98.19 (11. September 2001): 10904–9, <http://www.pnas.org/cgi/content/abstract/98/19/10904>.
32. K. K. Kwong et al., „Dynamic Magnetic Resonance Imaging of Human Brain Activity During Primary Sensory Stimulation“,

Proceedings of the National Academy of Sciences 89.12 (15. Juni 1992): 5675–79.

34. C. S. Roy und C. S. Sherrington, „On the Regulation of the Blood Supply of the Brain“, *Journal of Physiology* 11 (1890): 85–105.
35. M. I. Posner et al., „Localization of Cognitive Operations in the Human Brain“, *Science* 240.4859 (17. Juni 1988): 1627–31.
36. F. M. Mottaghy et al., „Facilitation of Picture Naming after Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation“, *Neurology* 53.8 (10. November 1999): 1806–12.
37. Daithí Ó hAnluain, „TMS: Twilight Zone Science?“ *Wired News*, 18. April 2002, <http://wired.com/news/medtech/0,1286,51699.00.html>.
38. Lawrence Osborne, „Savant for a Day“, *New York Times Magazine*, 22. Juni 2003, verfügbar unter <http://www.wireheading.com/brainstim/savant.html>.
39. Bruce H. McCormick, „Brain Tissue Scanner Enables Brain Microstructure Surveys“, *Neurocomputing* 44–46 (2002): 1113-18; Bruce H. McCormick, „Design of a Brain Tissue Scanner“, *Neurocomputing* 26-27 (1999): 1025-32; Bruce H. McCormick, „Development of the Brain Tissue Scanner“, Brain Networks Laboratory Technical Report, Texas A&M University Department of Computer Science, College Station, Tex., 18. März 2002, <http://research.cs.tamu.edu/bnl/pubs/McC02.pdf>.
40. Leif Finkel et al., „Meso-scale Optical Brain Imaging of Perceptual Learning“, University of Pennsylvania grant 2000–01737 (2000).
41. E. Callaway und R. Yuste, „Stimulating Neurons with Light“, *Current Opinions in Neurobiology* 12.5 (Oktober 2002): 587–92.
42. B. L. Sabatini und K. Svoboda, „Analysis of Calcium Channels in Single Spines Using Optical Fluctuation Analysis“, *Nature* 408.6812 (30. November 2000): 589–93.

43. John Whitfield, „Lasers Operate Inside Single Cells“, News@nature.com, 6. Oktober 2003, <http://www.nature.com/nsu/030929/030929-12.html> (Anmeldung erforderlich). Mazur's lab: <http://mazur-www.harvard.edu/research/>. Jason M. Samonds und A. B. Bonds, „From Another Angle: Differences in Cortical Coding Between Fine and Coarse Discrimination of Orientation“, *Journal of Neurophysiology* 91 (2004): 1193–1202.
44. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 2A, *Biocompatibility*, Abschnitt 15.6.2, „Bloodstream Intrusiveness“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2003), S. 157–59, <http://www.nanomedicine.com/NMIIA/15.6.2.htm>.
45. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities*, Abschnitt 7.3, „Communication Networks“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 186–88, <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.3.htm>.
46. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities*, Abschnitt 9.4.4.3, „Intercellular Passage“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 320–21, <http://www.nanomedicine.com/NMI/9.4.4.3.htm#p2>.
47. Keith L. Black, M. D. und Nagendra S. Ningaraj, „Modulation of Brain Tumor Capillaries for Enhanced Drug Delivery Selectively to Brain Tumor“, *Cancer Control* 11.3 (Mai/Juni 2004): 165–73, <http://www.moffitt.usf.edu/pubs/ccj/v11n3/pdf/165.pdf>.
48. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities*, Abschnitt 4.1, „Nanosensor Technology“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 93, <http://www.nanomedicine.com/NMI/4.1.htm>.
49. Conference on Advanced Nanotechnology (<http://www.foresight.org/Conferences/AdvNan02004/index.html>), NanoBioTech Congress and Exhibition (<http://www.nanobiotec.de/>), NanoBusiness Trends in Nanotechnology

(<http://www.nanoevent.com/>), und NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show (<http://www.nsti.org/events.html>).

50. Peter D. Kramer, *Listening to Prozac* (New York: Viking, 1993).
51. Das Forschungsgebiet von LeDoux sind Gehirnregionen, die Bedrohungserlebnisse verarbeiten, was vor allem die Amygdala einschließt – ein mandelförmiger Bereich im Kern des Gehirns. Die Amygdala speichert Erinnerungen an Bedrohungen und ist an der Auslösung von Angst beteiligt. Tomaso Poggio (MIT): „Synaptische Plastizität ist eine Hardwaregrundlage für Lernen, aber man darf nicht vergessen, dass Lernen mehr bedeutet als Erinnerung.“ Siehe T. Poggio und E. Bizzi, „Generalization in Vision and Motor Control“, *Nature* 431 (2004): 768–74. Siehe auch E. Benson, „The Synaptic Self“ APA Online, November 2002, <http://www.apa.org/monitor/nov02/synaptic.html>.
52. Anthony J. Bell, „Levels and Loops: The Future of Artificial Intelligence and Neuroscience“, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 354.1352 (29. Dezember 1999): 2013–20, <http://www.cnl.salk.edu/~tony/ptrsl.pdf>.
53. Peter Dayan und Larry Abbott, *Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 2001).
54. D. O. Hebb, *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory* (New York: Wiley, 1949).
55. Michael Domjan und Barbara Burkhard, *The Principles of Learning and Behavior*, 3d ed. (Pacific Grove, Calif.: Brooks/Cole, 1993).
56. J. Quintana und J. M. Fuster, „From Perception to Action: Temporal Integrative Functions of Prefrontal and Parietal Neurons“, *Cerebral Cortex* 9.3 (April–Mai 1999): 213–21; W. F. Asaad, G. Rainer, und E. K. Miller, „Neural Activity in the Primate Prefrontal Cortex During Associative Learning“, *Neuron* 21.6 (Dezember 1998): 1399–1407.

57. G. G. Turrigiano et al., „Activity-Dependent Scaling of Quantal Amplitude in Neocortical Neurons“, *Nature* 391.6670 (26. Februar 1998): 892–96; R. J. O’Brien et al., „Activity-Dependent Modulation of Synaptic AMPA Receptor Accumulation“, *Neuron* 21.5 (November 1998): 1067–78.
58. Aus „A New Window to View How Experiences Rewire the Brain“, Howard Hughes Medical Institute (19. Dezember 2002), <http://www.hhmi.org/news/svoboda2.html>. Siehe auch J. T. Trachtenberg et al., „Long-Term in Vivo Imaging of Experience-Dependent Synaptic Plasticity in Adult Cortex“, *Nature* 420.6917 (Dezember 2002): 788–94, http://cpmcnet.columbia.edu/dept/physio/physi02/Trachtenberg_NATURE.pdf; sowie Karen Zito und Karel Svoboda, „Activity-Dependent Synaptogenesis in the Adult Mammalian Cortex“, *Neuron* 35.6 (September 2002): 1015–17, <http://svobodalab.cshl.edu/reprints/2414zito02neur.pdf>.
59. Siehe http://whyfiles.org/184make_memory/4.html. Für weitere Informationen zu Dornfortsätzen und Erinnerung siehe J. Grutzendler et al., „Long-Term Dendritic Spine Stability in the Adult Cortex“, *Nature* 420.6917 (19.–26. Dezember 2002): 812–16.
60. S. R. Young und E. W. Rubel, „Embryogenesis of Arborization Pattern and Topography of Individual Axons in N. Laminaris of the Chicken Brain Stem“, *Journal of Comparative Neurology* 254.4 (22. Dezember 1986): 425–59.
61. Scott Makeig, „Swartz Center for Computational Neuroscience Vision Overview“, <http://www.sccn.ucsd.edu/VisionOverview.html>.
62. D. H. Hubel und T. N. Wiesel, „Binocular Interaction in Striate Cortex of Kittens Reared with Artificial Squint“, *Journal of Neurophysiology* 28.6 (November 1965): 1041–59.
63. Jeffrey M. Schwartz und Sharon Begley, *The Mind and the Brain: Neuroplasticity and the Power of Mental Force* (New York: Regan Books, 2002). Siehe auch C. Xerri, M. Merzenich et al., „The

Plasticity of Primary Somatosensory Cortex Paralleling Sensorimotor Skill Recovery from Stroke in Adult Monkeys“, *The Journal of Neurophysiology*, 79.4 (April 1980): 2119–48. Siehe auch S. Begley, „Survival of the Busiest“, *Wall Street Journal*, 11. Oktober 2002, <http://webreprints.djreprints.com/606120211414.html>.

64. Paula Tallal et al., „Language Comprehension in Language-Learning Impaired Children Improved with Acoustically Modified Speech“, *Science* 271 (5. Januar 1996): 81–84. Paula Tallal ist Board of Governors Professor für Neurowissenschaften und Kodirektor des CMBN (Center for Molecular and Behavioral Neuroscience) der Rutgers University, sowie Mitbegründer und Leiter der SCIL (Scientific Learning Corporation); siehe <http://www.cmbn.rutgers.edu/faculty/tallal.html>. Siehe auch Paula Tallal, „Language Learning Impairment: Integrating Research and Remediation“, *New Horizons for Learning* 4.4 (August– September 1998), http://www.new_horizons.org/neuro/tallal.htm, A. Pascual-Leone, „The Brain That Plays Music and Is Changed by It“, *Annals of the New York Academy of Sciences* 930 (Juni 2001): 315–29. Siehe auch Anmerkung 63.
65. F. A. Wilson, S. P. Scallan und P. S. Goldman-Rakic, „Dissociation of Object and Spatial Processing Domains in Primate Prefrontal Cortex.“ *Science* 260.5116 (25. Juni 1993): 1955–58.
66. C. Buechel, J. T. Coull und K. J. Friston, „The Predictive Value of Changes in Effective Connectivity for Human Learning“, *Science* 283.5407 (5. März 1999): 1538–41.
67. Den Forschern gelangen spektakuläre Aufnahmen von Gehirnzellen, die, infolge verschiedener Reize, temporäre und permanente Verbindungen ausbilden, und wiesen damit strukturelle Veränderungen nach, die schon lange als Mechanismus des Langzeitgedächtnisses vermutet wurden. „Pictures Reveal How Nerve Cells Form Connections to Store Short- and Long-Term

Memories in Brain“, University of California, San Diego, 29. November 2001, <http://ucsdnews.ucsd.edu/newsrel/science/mcceli.htm>; M. A. Colicos et al., „Remodeling of Synaptic Action Induced by Photoconductive Stimulation“, *Cell* 107.5 (30. November 2001): 605–16. Video link: <http://www.qflux.net/Neuro-Stim01.rm>, Neural Silicon Interface—Quantum Flux.

68. S. Lowel und W. Singer, „Selection of Intrinsic Horizontal Connections in the Visual Cortex by Correlated Neuronal Activity“, *Science* 255.5041 (10. Januar 1992): 209–12.
69. K. Si et al., „A Neuronal Isoform of CPEB Regulates Local Protein Synthesis and Stabilizes Synapse-Specific Long-Term Facilitation in Aplysia“, *Cell* 115.7 (26. Dezember 2003): 893–904; K. Si, S. Lindquist und E. R. Kandel, „A Neuronal Isoform of the Aplysia CPEB Has Prion-Like Properties“, *Cell* 115.7 (26. Dezember 2003): 879–91. Die Forscher kommen zu dem Ergebnis, dass CPEB möglicherweise zur Entstehung und Erhaltung von Langzeiterinnerungen beiträgt, indem es in Synapsen seine Form verändert, ähnlich der Deformation von Prionen (an BSE und anderen Nervenkrankheiten beteiligte Proteinfragmente). Ihre Arbeit weist darauf hin, dass das Protein seine Funktion im Prionenzustand erfüllt, was im Widerspruch zu der weitverbreiteten Annahme steht, dass Proteine mit prionischer Aktivität toxisch sind, oder zumindest nicht richtig funktionieren. Dieser prionische Mechanismus spielt auch eine Rolle für Krebstherapie und Organentwicklung, vermutet Eric R. Kandel, Professor für Physiologie und Zellbiophysik, Psychiatrie, Biochemie und molekulare Biophysik an der Columbia University und Träger des Nobelpreises für Medizin von 2000. Siehe Pressemitteilung des Whitehead Institute, http://www.wi.mit.edu/nap/features/nap_feature_memory.html.
70. M. C. Anderson et al., „Neural Systems Underlying the Suppression of Unwanted Memories“, *Science* 303.5655 (9. Januar 2004): 232–35. Diese Arbeit könnte ein Ansporn für die Entwicklung neuer

Methoden zur Überwindung traumatischer Erinnerungen sein. Keay Davidson, „Study Suggests Brain Is Built to Forget: MRIs in Stanford Experiments Indicate Active Suppression of Unneeded Memories“, *San Francisco Chronicle*, 9. Januar 2004, <http://www.sfgate.com/cgi-bin/article.cgi?file=/c/a/2004/01/09/FORGET.TMP&type=science>.

71. Dieter C. Lie et al., „Neurogenesis in the Adult Brain: New Strategies for CNS Diseases“, *Annual Review of Pharmacology and Toxicology* 44 (2004): 399–421.
72. H. van Praag, G. Kempermann und F. H. Gage, „Running Increases Cell Proliferation and Neurogenesis in the Adult Mouse Dentate Gyrus“, *Nature Neuroscience* 2.3 (März 1999): 266–70.
73. Minsky und Papert, *Perceptrons*.
74. Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines* (New York: Viking, 1999), S. 79.
75. Basisfunktionen sind nichtlineare Funktionen, durch deren Linearkombinationen (gewichtete Summen mehrerer Basisfunktionen) jede nichtlineare Funktion angenähert werden kann. Pouget und Snyder, „Computational Approaches to Sensorimotor Transformations“, *Nature Neuroscience* 3.11 Supplement (November 2000): 1192–98.
76. T. Poggio, „A Theory of How the Brain Might Work“, in *Proceedings of Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 4 (Cold Spring Harbor, N.Y.: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1990), 899–910. Siehe auch T. Poggio und E. Bizzi, „Generalization in Vision and Motor Control“, *Nature* 431 (2004): 768–74.
77. R. Llinas und J. P. Welsh, „On the Cerebellum and Motor Learning“, *Current Opinion in Neurobiology* 3.6 (Dezember 1993): 958–65; E. Courchesne und G. Allen, „Prediction and Preparation, Fundamental Functions of the Cerebellum“, *Learning and Memory* 4.1 (Mai–Juni

1997): 1–35; J. M. Bower, „Control of Sensory Data Acquisition“, *International Review of Neurobiology* 41 (1997): 489–513.

78. J. Voogd und M. Glickstein, „The Anatomy of the Cerebellum“, *Trends in Neuroscience* 21.9 (September 1998): 370–75; John C. Eccles, Masao Ito, und János Szentágothai, *The Cerebellum as a Neuronal Machine* (New York: Springer-Verlag, 1967); Masao Ito, *The Cerebellum and Neural Control* (New York: Raven, 1984).
79. N. Bernstein, *The Coordination and Regulation of Movements* (New York: Pergamon Press, 1967).
80. U. S. Office of Naval Research press release, „Boneless, Brainy, and Ancient“, 26. September, 2001, http://www.eurekalert.org/pub_releases/2001-11/oonr-bba112601.php; der Tentakel des Tintenfisches „könnte ohne Weiteres als Grundlage für die nächste Generation von Roboterarmen dienen, zum Einsatz unter Wasser, im Weltraum und an Land.“
81. S. Grossberg und R.W. Paine, „A Neural Model of Cortico-Cerebellar Interactions During Attentive Imitation and Predictive Learning of Sequential Handwriting Movements“, *Neural Networks* 13.8-9 (Oktober– November 2000): 999–1046.
82. Voogd und Glickstein, „Anatomy of the Cerebellum“; Eccles, Ito und Szentágothai, *Cerebellum as a Neuronal Machine*; Ito, *Cerebellum and Neural Control*; R. Llinas, in *Handbook of Physiology*, Bd. 2, The Nervous System, ed. V.B. Brooks (Bethesda, Md.: American Physiological Society, 1981), S. 831–976.
83. J. L. Raymond, S. G. Lisberger und M. D. Mauk, „The Cerebellum: A Neuronal Learning Machine?“ *Science* 272.5265 (24. Mai 1996): 1126– 31; J. J. Kim und R. F. Thompson, „Cerebellar Circuits and Synaptic Mechanisms Involved in Classical Eyeblink Conditioning“, *Trends in Neuroscience* 20.4 (April 1997): 177–81.

84. Die Simulation umfasste 10.000 Granularzellen, 900 Golgizellen, 500 Moosfaserzellen, 20 Purkinjezellen und 6 Nucleuszellen.
85. J. F. Medina et al., „Timing Mechanisms in the Cerebellum: Testing Predictions of a Large-Scale Computer Simulation“, *Journal of Neuroscience* 20.14 (15. Juli 2000): 5516–25; Dean Buonomano und Michael Mauk, „Neural Network Model of the Cerebellum: Temporal Discrimination and the Timing of Motor Responses“, *Neural Computation* 6.1 (1994): 38–55.
86. Medina et al., „Timing Mechanisms in the Cerebellum.“
87. Carver Mead, *Analog VLSI and Neural Systems* (Boston: Addison-Wesley Longman, 1989).
88. Lloyd Watts, „Visualizing Complexity in the Brain“, in *Computational Intelligence: The Experts Speak*, D. Fogel und C. Robinson, eds. (Hoboken, N.J.: IEEE Press/Wiley, 2003), S. 45–56, <http://www.lloydwatts.com/wcci.pdf>.
89. Ebd.
90. Siehe <http://www.lloydwatts.com/neuroscience.shtml>. NanoComputer Dream Team, „The Law of Accelerating Returns, Part II“, <http://nanocomputer.org/index.cfm?content=90&Menu=19>.
91. Siehe http://info.med.yale.edu/bbs/faculty/she_go.html.
92. Gordon M. Shepherd, ed., *The Synaptic Organization of the Brain*, 4th ed. (New York: Oxford University Press, 1998), S. vi.
93. E. Young, „Cochlear Nucleus“, ebd., S. 121–58.
94. Tom Yin, „Neural Mechanisms of Encoding Binaural Localization Cues in the Auditory Brainstem“, in D. Oertel, R. Fay und A. Popper, eds., *Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway* (New York: Springer-Verlag, 2002), S. 99–159.
95. John Casseday, Thane Premouw und Ellen Covey, „The Inferior Colliculus: A Hub for the Central Auditory System“, in Oertel, Fay

und Popper, *Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway*, S. 238–318.

96. Abbildung von Lloyd Watts, <http://www.lloydwatts.com/neuroscience.shtml>, übernommen aus E. Young, „Cochlear Nucleus“ in G. Shepherd, ed., *The Synaptic Organization of the Brain*, 4th ed. (New York: Oxford University Press, 2003 [erste Auflage: 1998]), S. 121–58; D. Oertel in D. Oertel, R. Fay und A. Popper, eds., *Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway* (New York: Springer-Verlag, 2002), S. 1–5; John Casseday, T. Fremouw und E. Covey, „Inferior Colliculus“, ebd.;

J. LeDoux, *The Emotional Brain* (New York: Simon & Schuster, 1997); J. Rauschecker und B. Tian, „Mechanisms and Streams for Processing of ‚What‘ and ‚Where‘ in Auditory Cortex“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97.22: 11800–11806.

Modellierte Gehirnbereiche (Siglen beziehen sich stets auf die englische Bezeichnung, auch dort, wo sie eingedeutscht ist):

Cochlea: Hörsinnesorgan. Dreißigtausend Härchen wandeln Bewegungen des Steigbügelknochens in eine spektrale Klangdarstellung um.

MC: Multipolare Zellen. Messen das Energiespektrum.

GBC: Globular bushy cells. Leiten Aktivierungen der auditorischen Nerven an den lateralen unteren Olivenkomplex (einschließlich LSO und MSO) weiter. Kodieren Timing und Amplitude von Signalen für den binauralen Vergleich der Signalstärke.

SBS: Spherical bushy cells. Sorgen für zeitliche Präzision; Präprozessor für Berechnung der Laufzeitdifferenz (Verzögerung, mit welcher der Schall die Ohren erreicht; zeigt uns die Richtung der Schallquelle).

OC: Oktopuszellen. Reagieren auf Einschwingungen.

DCN: Dorsaler cochlearer Nucleus. Erkennung spektraler Gefälle und Anpassung an Lärmpegel.

VNTB: Ventraler Nucleus des Trapezkörpers. Feedback-Signale zur Funktionsmodulation der äußeren Haarzellen der Cochlea.
VNLL, PON: Ventraler Nucleus des Lemniscus lateralis; periolivarer Nucleus. Verarbeitung von Einschwingsignalen der OC.

MSO: Mediale obere Olive. Berechnet die Laufzeitdifferenz.

LSO: Laterale obere Olive. Ebenfalls an Berechnung der Laufzeitdifferenz beteiligt.

ICC: Zentraler Nukleus des Colliculus inferior. Integration der vielfältigen Klangdarstellungen.

ICx: Äußerer Nukleus des Colliculus inferior. Verfeinerung der Lokalisation von Schallquellen.

SC: Colliculus superior. Integration von visuellen und auditorischen Informationen.

MGB: Metathalamus. Auditorischer Bereich des Thalamus.

LS: Lymbisches System. Umfasst viele Strukturen, unter anderem assoziiert mit Emotionen, Erinnerung, Umgebung, etc.

AC: Auditorischer Kortex.

97. M. S. Humayun et al., „Human Neural Retinal Transplantation“, *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 41.10 (September 2000): 3100–3106.
98. Information Science and Technology Colloquium Series, 23. Mai 2001,
<http://isandtcolloq.gsfc.nasa.gov/spring2001/speakers/poggio.html>.
99. Kah-Kay Sung und Tomaso Poggio, „Example-Based Learning for View-Based Human Face Detection“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20.1 (1998): 39–51,
<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=275345&dl=ACM&coll=GUIDE>.

100. Maximilian Riesenhuber und Tomaso Poggio, „A Note on Object Class Representation and Categorical Perception“, Center for Biological and Computational Learning, MIT, AI Memo 1679 (1999), <ftp://publications.ai.mit.edu/ai-publications/pdf/AIM-1679.pdf>.
101. K. Tanaka, „Inferotemporal Cortex and Object Vision“, *Annual Review of Neuroscience* 19 (1996): 109–39; Anuj Mohan, „Object Detection in Images by Components“, Center for Biological and Computational Learning, MIT, AI Memo 1664 (1999), <http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/12185/ftp:zSzzSzpublications.ai.mit.eduzSzai-publicationszSz1500–1999zSzAIM-1664.pdf/mohan99object.pdf>; Anuj Mohan, Constantine Papageorgiou und Tomaso Poggio, „Example-Based Object Detection in Images by Components“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 23.4 (April 2001), <http://cbcl.mit.edu/projects/cbd/publications/ps/mohan-ieee.pdf>; B. Heisele, T. Poggio und M. Pontil, „Face Detection in Still Gray Images“, Artificial Intelligence Laboratory, MIT, Technical Report AI Memo 1687 (2000). Siehe auch Bernd Heisele, Thomas Serre und Stanley Bilesch, „Component-Based Approach to Face Detection“, Artificial Intelligence Laboratory and the Center for Biological and Computational Learning, MIT (2001), <http://www.ai.mit.edu/research/abstracts/abstracts2001/vision-applied-to-people/03heisele2.pdf>.
102. D. Van Essen und J. Gallant, „Neural Mechanisms of Form and Motion Processing in the Primate Visual System“, *Neuron* 13.1 (Juli 1994): 1–10.
103. Shimon Ullman, *High-Level Vision: Object Recognition and Visual Cognition* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1996); D. Mumford, „On the Computational Architecture of the Neocortex. II. The Role of Corticocortical Loops“, *Biological Cybernetics* 66.3 (1992): 241–51; R. Rao und D. Ballard, „Dynamic Model of Visual Recognition

Predicts Neural Response Properties in the Visual Cortex“, *Neural Computation* 9.4 (15. Mai 1997): 721–63.

104. B. Roska und F. Werblin, „Vertical Interactions Across Ten Parallel, Stacked Representations in the Mammalian Retina“, *Nature* 410.6828 (29. März 2001): 583–87; University of California, Berkeley, Pressemeldung, „Eye Strips Images of All but Bare Essentials Before Sending Visual Information to Brain, UC Berkeley Research Shows“, 28. März 2001, www.berkeley.edu/news/media/releases/2001/03/28_wers1.html.
105. Hans Moravec und Scott Friedman gründeten, basierend auf Moravecs Forschung, das Robotikunternehmen Seegrid. Siehe www.Seegrid.com.
106. M. A. Mahowald und C. Mead, „The Silicon Retina“, *Scientific American* 264.5 (Mai 1991): 76–82.
107. Genauer gesagt wird auf einen Rezeptor ein Tiefpass angewandt. Das Ergebnis wird mit dem Signal des benachbarten Rezeptors multipliziert. Tut man dies in beide Richtungen und zieht das Resultat von Null ab, so erhält man ein Ergebnis, das die Richtung der Bewegung anzeigt.
108. Über Berger: <http://www.usc.edu/dept/engineering/CNE/faculty/Berger.html>.
109. „The World’s First Brain Prosthesis“, *New Scientist* 177.2386 (25. März 2003): 4, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993488>.
110. Charles Choi, „Brain-Mimicking Circuits to Run Navy Robot“, UPI, 7. Juni 2004, <http://www.upi.com/view.cfm?StoryID=20040606-103352-6086r>.
111. Giacomo Rizzolatti et al., „Functional Organization of Inferior Area 6 in the Macaque Monkey. II. Area F5 and the Control of Distal Movements“, *Experimental Brain Research* 71.3 (1998): 491–507.

- M. A. Arbib, „The Mirror System, Imitation, and the Evolution of Language“, in Kerstin Dautenhahn und Chrystopher L. Nehaniv, eds., *Imitation in Animals and Artifacts* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 2002).
112. Marc D. Hauser, Noam Chomsky und W. Tecumseh Fitch, „The Faculty of Language: What Is It, Who Has It, and How Did It Evolve?“ *Science* 298 (November 2002): 1569–79, www.wjh.harvard.edu/~mnkylab/publications/languagespeech/Hauser,Chomsky,Fitch.pdf.
113. Daniel C. Dennett, *Freedom Evolves* (New York: Viking, 2003).
114. Siehe Sandra Blakeslee, „Humanity? Maybe It’s All in the Wiring“, *New York Times*, 11. Dezember 2003, <http://www.nytimes.com/2003/12/09/science/09BRAI.html?ex=1386306000&en=294f5e91dd262a1a&ei=5007&partner=USERLAND>.
115. Antonio R. Damasio, *Descartes’ Error: Emotion, Reason and the Human Brain* (New York: Putnam, 1994).
116. M. P. Maher et al., „Microstructures for Studies of Cultured Neural Networks“, *Medical and Biological Engineering and Computing* 37.1 (Januar 1999): 110–18; John Wright et al., „Towards a Functional MEMS Neurowell by Physiological Experimentation“, *Technical Digest, ASME, 1996 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Atlanta, November 1996, DSC (Dynamic Systems and Control Division)*, Bd. 59, S. 333–38.
117. W. French Anderson, „Genetics and Human Malleability“, *Hastings Center Report* 23.20 (Januar/Februar 1990): 1.
118. Ray Kurzweil, „A Wager on the Turing Test: Why I Think I Will Win“, *KurzweilAI.net*, 9. April 2002, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0374.html>.
- 119.

120. Robert A. Freitas Jr. hat ein zukünftiges, nanotechnik-basiertes Gehirn-Upload-System beschrieben, das praktisch instantan arbeiten würde. Freitas (persönliche Kommunikation, Januar 2005): „Ein In-vivo-Fasernetz, wie auf <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.3.1.htm> beschrieben, kann Datenverkehr mit 10^{18} Bits/s verarbeiten – genug für eine Überwachung des Gehirnzustandes in Echtzeit. Das Fasernetz hat ein Volumen von 30 cm^2 und erzeugt 4–6 Watt Wärme, was beides klein genug ist, um es sicher in einem menschlichen Gehirn von 1400 cm^2 und 25 Watt zu installieren. Die Signale legen höchstens ein paar Meter mit annähernd Lichtgeschwindigkeit zurück; die Übertragungszeit vom Ursprung der neuronalen Signale im Gehirn in das externe, für den Upload zuständige Computersystem beträgt somit $\sim 0,00001 \text{ ms}$, was deutlich unter der Dauer eines neuronalen Aktivierungszyklus von 5 ms liegt. Im Abstand von etwa 2 Mikrometern platzierte chemische Sensoren zur Überwachung von Neuronen könnten dann chemische Ereignisse innerhalb eines 5-ms-Fensters erfassen, da das der ungefähren Diffusionszeit beispielsweise eines Neuropeptids über eine Distanz von 2 Mikrometern entspricht (<http://www.nanomedicine.com/NMII/Tables/3.4.jpg>). Daher können Aufzeichnungen des menschlichen Gehirns vermutlich instantan erstellt werden, zumindest aber im Zeitrahmen der neuronalen Aktivität, nach dem Motto „wir verpassen nichts Wichtiges“.
121. M. C. Diamond et al., „On the Brain of a Scientist: Albert Einstein“, *Experimental Neurology* 88 (1985): 198–204.

Kapitel 5: GNR

1. Samuel Butler (1835–1902), „Darwin Among the Machines“, Christ Church Press, 13. Juni 1863 (veröffentlicht 1912 durch Festing Jones in *The Notebooks of Samuel Butler*).
2. Peter Weibel, „Virtual Worlds: The Emperor’s New Bodies“, in *Ars Electronica: Facing the Future*, ed. Timothy Druckery (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1999), S. 207–23; online erhältlich unter http://www.aec.at/en/archiv_files/19902/EI990b_009.pdf.
3. James Watson und Francis Crick, „Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid“, *Nature* 171.4356 (23. April 1953): 737–38, <http://www.nature.com/nature/dna50/watsoncrick.pdf>.
4. Robert Waterston, zitiert in „Scientists Reveal Complete Sequence of Human Genome“, CBC News, 14. April 2003, <http://www.cbc.ca/story/science/national/2003/04/14/genome030414.html>.
5. Siehe Anmerkung 57 in Kapitel 2.
6. Der ursprüngliche Bericht von Crick und Watson, der sich auch heute noch zu lesen lohnt, findet sich in James A. Peters, ed., *Classic Papers in Genetics* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1959). Eine spannende Rekapitulation der Erfolge und Fehlschläge, die zu Entdeckung der Doppelhelix führten, bietet J. D. Watson, *The Double Helix: A Personal Account of the Discovery of the Structure of DNA* (New York: Atheneum, 1968). Nature.com bietet eine Sammlung von Cricks Veröffentlichungen auf <http://www.nature.com/nature/focus/crick/index.html>.
7. Morislav Radman und Richard Wagner, „The High Fidelity of DNA Duplication“, *Scientific American* 259.2 (August 1988): 40–46.

8. Struktur und Verhalten von DNS und RNS beschreiben Gary Felsenfeld, „DNA“ und James Darnell, „RNA“, beides in *Scientific American* 253.4 (Oktober 1985), S. 58–67 bzw. 68–78.
9. Mark A. Jobling und Chris Tyler-Smith, „The Human Y Chromosome: An Evolutionary Marker Comes of Age“, *Nature Reviews Genetics* 4 (August 2003): 598–612; Helen Skaletsky et al., „The Male-Specific Region of the Human Y Chromosome Is a Mosaic of Discrete Sequence Classes“, *Nature* 423 (19. Juni 2003): 825–37.
10. Fehlgebildete Proteine sind möglicherweise die gefährlichsten Gifte überhaupt. Untersuchungen weisen darauf hin, dass sie hinter zahlreichen Krankheitsprozessen stecken. Unterschiedlichste Krankheiten, unter anderem Alzheimer, Parkinson, die menschliche Form von BSE, Mukoviszidose und Diabetes, haben ihre Ursache vermutlich in der Unfähigkeit des Körpers, falsch gefaltete Proteine zu eliminieren.

Proteinmoleküle übernehmen in Zellen die meiste Arbeit. Dazu werden sie innerhalb der jeweiligen Zelle anhand von DNS-Bauplänen erzeugt. Sie haben zunächst die Form langer Aminosäurenketten und müssen dann in exakt festgelegte dreidimensionale Konfigurationen gefaltet werden, um als Enzyme, Transportproteine etc. zu fungieren. Giftige Schwermetalle beeinträchtigen die Funktion dieser Enzyme und verschlimmern somit das Problem. Genetische Mutationen können zudem die individuelle Anfälligkeit für Anhäufung fehlgebildeter Proteine erhöhen.

Wenn Protofibrillen beginnen, sich zu verkleben, bilden sie Filamente, Fibrillen und schließlich größere kugelförmige Strukturen, sogenannte amyloide Plaques. Bis vor Kurzem wurden diese unlöslichen Beläge als pathologische Agenten der Krankheit angesehen, doch mittlerweile ist bekannt, dass die Protofibrillen selbst das Problem sind. Die Geschwindigkeit, mit der Protofibrillen zu unlöslichen amyloiden Plaques werden, nimmt mit

fortschreitender Erkrankung ab. Das erklärt, warum manche Menschen große Ansammlungen von Plaques aber keinerlei Anzeichen von Alzheimer aufweisen, während die Krankheit bei manchen Leuten mit kaum erkennbaren Belägen stark ausgeprägt ist. Bei manchen Menschen bilden sich schnell amyloide Plaques, was weitere Schäden verhindert. Bei anderen Menschen werden Protofibrillen nicht so schnell umgewandelt und können mehr Schaden anrichten. Bei diesen Leuten finden sich kaum amyloide Plaques. Siehe Hammarström, Frank Schneider und Jeffrey W. Kelly, „Trans-Suppression of Misfolding in an Amyloid Disease“, *Science* 293.5539 (28. September 2001): 2459–62.

11. Einen faszinierenden Abriss der modernen Biologie bietet Horace F. Judson, *The Eighth Day of Creation: The Makers of the Revolution in Biology* (Woodbury, N.Y.: CSHL Press, 1996).
12. Raymond Kurzweil und Terry Grossman, M.D., *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever* (New York: Rodale, 2004). Siehe <http://www.Fantastic-Voyage.net> und <http://www.RayandTerry.com>.
13. Raymond Kurzweil, *The 10% Solution for a Healthy Life: How to Eliminate Virtually All Risk of Heart Disease and Cancer* (New York: Crown Books, 1993).
14. Kurzweil und Grossman, *Fantastic Voyage* beschreibt „Ray & Terry’s Longevity Program“.
15. Der Test des „biologischen Alters“, der sogenannte H-Scan-Test, untersucht folgendes: Audioreaktionszeit, höchste hörbare Frequenz, vibrotaktile Empfindlichkeit, visuelle Reaktion, Reaktionszeit der Muskeln, Lungenvolumen, visuelle Reaktion mit Entscheidung, Gedächtnis (Sequenzlänge) und visuelle Anpassung. Der Autor unterzog sich diesem Test am Frontier Medical Institute (Grossmans Klinik für Langlebigkeit), <http://www.FMIClinic.com>. Für Informationen zum H-Scan-Test siehe Diagnostic and Lab Testing, Longevity Institute, Dallas, <http://www.lidhealth.com/diagnostic.html>.

16. Kurzweil und Grossman, *Fantastic Voyage*, Kapitel 10: „Ray’s Personal Program“.
17. Ebd.
18. Aubrey D. N. J. de Grey, „The Foreseeability of Real Anti-Aging Medicine: Focusing the Debate“, *Experimental Gerontology* 38.9 (September 2003): 927–34; Aubrey D. N. J. de Grey, „An Engineer’s Approach to the Development of Real Anti-Aging Medicine“, *Science of Aging, Knowledge, Environment* 1 (2003): Aubrey D. N. J. de Grey et al., „Is Human Aging Still Mysterious Enough to Be Left Only to Scientists?“ *BioEssays* 24.7 (Juli 2002): 667–76.
19. Aubrey D. N. J. de Grey, ed., *Strategies for Engineered Negligible Senescence: Why Genuine Control of Aging May Be Foreseeable*, Annals of the New York Academy of Sciences, Bd. 1019 (New York: New York Academy of Sciences, Juni 2004).
20. Die Genexpression hängt nicht nur von der Zellart ab, sondern auch von Umwelteinflüssen und Entwicklungsprozessen. Selbst Bakterien können durch Regulation der Proteinsynthese auf Umwelteinflüsse reagieren. *E. coli* beispielsweise setzt die Produktion von Proteinen, die den Stickstoffgehalt der Luft ermitteln, aus, falls andere, energieeffizientere Stickstoffquellen zur Verfügung stehen. Eine Untersuchung von 1.800 Genen in Erdbeeren ergab, dass die Expression von 200 dieser Gene vom Entwicklungsstadium der Pflanze abhängt. E. Marshall, „An Array of Uses: Expression Patterns in Strawberries, Ebola, TB, and Mouse Cells“, *Science* 286.5439 (1999): 445.
21. Gene enthalten neben dem Proteincode noch Steuersequenzen, sogenannte Promotoren und Enhancer, die festlegen, wann und wo das Gen exprimiert wird. Sie befinden sich in der Regel unmittelbar „vor“ der proteinkodierenden DNS. Der Enhancer aktiviert den Promotor und steuert dadurch die Genexpression. Für die meisten Gene muss zunächst der Enhancer exprimiert werden. Enhancers

wurden als „bestimmender Faktor der in Raum (Zellart) und Zeit differenzierten Transkription“ bezeichnet; und jedes Gen kann mehrere Enhancer haben. S. F. Gilbert, *Developmental Biology*, 6th ed. [Sunderland, Mass.: Sinauer Associates, 2000]; online verfügbar unter www.ncbi.nlm.nih.gov/books/bv.fcgi?call=bv.View..ShowSection&rid=.0BpKYEB-SPfx18nm8QOxH).

Transkriptionsfaktoren initiieren oder unterdrücken die Expression eines Gens, indem sie an Enhancer oder Promotoren binden. Die Erforschung von Transkriptionsfaktoren hat unser Verständnis der Genexpression verändert. Gilbert im Kapitel „The Genetic Core of Development: Differential Gene Expression“: „Das Gen gilt nicht mehr als unabhängige Einheit bei der Steuerung von Proteinsynthese. Natalie Anger schrieb (1992): ‚Eine Reihe von Entdeckungen deutet darauf hin, dass die DNS einer gewissen Art von Politikern ähnelt, umgeben von einem Stab von Proteingehilfen und -beratern, von denen sie sich massieren, verdrehen und gelegentlich neu erfinden lassen, damit der Körperbauplan irgendeinen Sinn ergeben kann.‘“

22. Bob Holmes, „Gene Therapy May Switch Off Huntington’s“, 13. März 2003, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993493>. „Emerging as a powerful tool for reverse genetic analysis, RNAi is rapidly being applied to study the function of many genes associated with human disease, in particular those associated with oncogenesis and infectious disease.“ J. C. Cheng, T. B. Moore und K. M. Sakamoto, „RNA Interference and Human Disease“, *Molecular Genetics and Metabolism* 80.1–2 (Oktober 2003): 121–28. RNAi is a „potent and highly sequence-specific mechanism“, L. Zhang, D. K. Fogg und D. M. Waisman, „RNA Interference-Mediated Silencing of the S100A10 Gene Attenuates Plasmin Generation and Invasiveness of Colo 222 Colorecta Cancer Cells“, *Journal of Biological Chemistry* 279.3 (16. Januar 2004): 2053–62.

23. Jeder Chip enthält synthetische Oligonukleotide, deren jeweilige Sequenz je ein spezifisches Gen identifiziert. „Um festzustellen, welche Gene in einer Probe exprimiert wurden, isolieren Wissenschaftler die RNS aus der Probe, konvertieren sie zu komplementärer DNS (cDNS), markieren sie mit fluoreszierendem Farbstoff und lassen das Ganze über den Chip laufen. Jede markierte cDNS bindet dabei ein Oligonukleotid mit passender Sequenz und bringt die entsprechende Position auf dem Chip zum Leuchten. Ein automatischer Scanner ermittelt, welche Oligonukleotide gebunden sind und somit, welche Sequenzen exprimiert wurden...“ E. Marshall, „Do-It-Yourself Gene Watching“, *Science* 286.5439 (15. Oktober 1999): 444–47.
24. Ebd.
25. J. Rosamond und A. Allsop, „Harnessing the Power of the Genome in the Search for New Antibiotics“, *Science* 287.5460 (17. März 2000): 1973–76.
26. T. R. Golub et al., „Molecular Classification of Cancer: Class Discovery and Class Prediction by Gene Expression Monitoring“, *Science* 286.5439 (15. Oktober 1999): 531–37.
27. Ebd., berichtet in A. Berns, „Cancer: Gene Expression in Diagnosis“, *Nature* 403 (3. Februar 2000): 491–92. In einer anderen Studie zeigten 1 Prozent der Gene in gealterten Muskeln einen Expressionsrückgang. Diese Gene erzeugen Proteine, die mit Energieproduktion und Zellbau assoziiert werden, was Sinn macht, angesichts der im Alter abnehmenden Körperkraft. Erhöht war dagegen die Expression von Stressgenen, welche beschädigte DNS und Proteine reparieren. J. Marx, „Chipping Away at the Causes of Aging“, *Science* 287.5462 (31. März 2000): 2390.
- Noch ein Beispiel: Lebermetastasen, eine häufige Ursache kolorektaler Karzinome, reagieren je nach ihrem genetischen Profil unterschiedlich auf Behandlungen. Genexpressionsanalyse eignet

sich darum hervorragend, um die effektivste Behandlungsmethode zu bestimmen. J. C. Sung et al. „Genetic Heterogeneity of Colorectal Cancer Liver Metastases“, *Journal of Surgical Research* 114.2 (Oktober 2003): 251.

Letztes Beispiel: Die Untersuchung von Reed-Stenberg-Zellen des Hodkin-Lymphoms gestaltete sich vormals als schwierig, da diese Zellen im infizierten Gewebe extrem rar gesät sind. Genexpressionsanalyse liefert nun Hinweise über den Ursprung dieser Zellen. J. Cossman et al., „Reed-Sternberg Cell Genome Expression Supports a B-Cell Lineage“, *Blood* 94.2 (15. Juli 1999): 411–16.

28. T. Ueland et al., „Growth Hormone Substitution Increases Gene Expression of Members of the IGF Family in Cortical Bone from Women with Adult Onset Growth Hormone Deficiency — Relationship with Bone Turn-Over“, *Bone* 33.4 (Oktober 2003): 638–45.
29. R. Lovett, „Toxicologists Brace for Genomics Revolution“, *Science* 289.5479 (28. Juli 2000): 536–37.
30. Gentransfer in somatische Zellen beeinflusst einen Teil der Zellen des Körpers für eine gewisse Dauer. Theoretisch ist es auch möglich, das Erbgut in Spermien und Eizellen zu verändern, um die Veränderungen an neue Generationen weiterzugeben. Ein solches Vorgehen ist ethisch bedenklich und wurde noch nicht getestet. „Gene Therapy“, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Gene_therapy.
31. Gene kodieren Proteine, die lebenswichtige Funktionen im Körper erfüllen. Abnormale oder mutierte Gene kodieren Proteine, die diese Funktionen nicht erfüllen können, wodurch es zu genetisch bedingten Behinderungen und Krankheiten kommt. Das Ziel der Stammzelltherapie ist, defekte Gene zu ersetzen, sodass normale Proteine produziert werden können. Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten; bei der üblichen Vorgehensweise wird das

therapeutische Gen durch ein Transportmolekül, einen sogenannten „Vektor“, eingeschleust. „Derzeit dient üblicherweise ein Virus als Vektor, der genetisch verändert wurde, sodass er gewöhnliche menschliche DNS überträgt. Viren haben eine Methode entwickelt, um ihre Gene zu kapseln und in einer pathogenen Weise an menschliche Zellen zu übergeben. Wissenschaftler haben versucht, diesen Mechanismus auszunutzen und das Virusgenom so zu manipulieren, dass es krankheitserregende Gene entfernt und therapeutische Gene einfügt.“ (Human Genome Project, „Gene Therapy“,

http://www.ornl.gov/TechResources/Human_Genome/medicine/genetherapy.html). Siehe Webseite des Human Genome Project für mehr Informationen zu Stammzelltherapie. Stammzelltherapie ist ein so wichtiger Forschungsbereich, dass ihr derzeit sechs wissenschaftliche Zeitschriften und vier professionelle Vereinigungen gewidmet sind.

32. K. R. Smith, „Gene Transfer in Higher Animals: Theoretical Considerations and Key Concepts“, *Journal of Biotechnology* 99.1 (9. Oktober 2002): 1–22.
33. Anil Ananthaswamy, „Undercover Genes Slip into the Brain“, 20. März 2003, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993520>.
34. A. E. Trezise et al., „In Vivo Gene Expression: DNA Electrotransfer“, *Current Opinion in Molecular Therapeutics* 5.4 (August 2003): 397–404.
35. Sylvia Westphal, „DNA Nanoballs Boost Gene Therapy“, 12. Mai 2002, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99992257>.
36. L. Wu, M. Johnson und M. Sato, „Transcriptionally Targeted Gene Therapy to Detect and Treat Cancer“, *Trends in Molecular Medicine* 9.10 (Oktober 2003): 421–29.
37. S. Westphal, „Virus Synthesized in a Fortnight“, 14. November 2003, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994383>.

38. G. Chiesa, „Recombinant Apolipoprotein A-I(Milano) Infusion into Rabbit Carotid Artery Rapidly Removes Lipid from Fatty Streaks“, *Circulation Research* 90.9 (17. Mai 2002): 974–80; P. K. Shah et al., „High-Dose Recombinant Apolipoprotein A-I(Milano) Mobilizes Tissue Cholesterol and Rapidly Reduces Plaque Lipid and Macrophage Content in Apolipoprotein e-Deficient Mice“, *Circulation* 103.25 (26. Juni 2001): 3047–50.
39. S. E. Nissen et al., „Effect of Recombinant Apo A-I Milano on Coronary Atherosclerosis in Patients with Acute Coronary Syndromes: A Randomized Controlled Trial“, *JAMA* 290.17 (5. November 2003): 2292–2300.
40. Eine Phase-2-Studie zeigte „merklich erhöhte HDL-Werte und reduzierte LDL-Werte“. M. E. Brousseau et al., „Effects of an Inhibitor of Cholesteryl Ester Transfer Protein on HDL Cholesterol“, *New England Journal of Medicine* 350.15 (8. April 2004): 1505–15,
<http://content.nejm.org/cgi/content/abstract/350/15/1505>.
Breitangelegte Phase-3-Studien begannen 2003. Informationen zu Torcetrapib finden sich auf der Pfizer-Webseite:
http://www.pfizer.com/are/investors_reports/annual_2003/review/p2_003ar14_15.htm.
41. O. J. Finn, „Cancer Vaccines: Between the Idea and the Reality“, *Nature Reviews: Immunology* 3.8 (August 2003): 630–41; R. C. Kennedy und M. H. Shearer, „A Role for Antibodies in Tumor Immunity“, *International Reviews of Immunology* 22.2 (März–April 2003): 141–72.
42. T. F. Greten und E. M. Jaffee, „Cancer Vaccines“, *Journal of Clinical Oncology* 17.3 (März 1999): 1047–60.
43. „Cancer ‚Vaccine‘ Results Encouraging“, BBCNews, 8. Januar 2001, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/health/1102618.stm>, bzgl. E. M. Jaffee et al., „Novel Allogeneic Granulocyte-Macrophage Colony-Stimulating Factor-Secreting Tumor Vaccine for Pancreatic Cancer:

A Phase I Trial of Safety and Immune Activation“, *Journal of Clinical Oncology* 19.1 (1. Januar 2001): 145–56.

44. John Travis, „Fused Cells Hold Promise of Cancer Vaccines“, 4. März 2000, <http://www.sciencenews.org/articles/20000304/fob3.asp>, bzgl. D. W. Kufe, „Smallpox, Polio and Now a Cancer Vaccine?“ *Nature Medicine* 6 (März 2000): 252–53.
45. J. D. Lewis, B. D. Reilly und R. K. Bright, „Tumor-Associated Antigens: From Discovery to Immunity“, *International Reviews of Immunology* 22.2 (März–April 2003): 81–112.
46. T. Boehm et al., „Antiangiogenic Therapy of Experimental Cancer Does Not Induce Acquired Drug Resistance“, *Nature* 390.6658 (27. November 1997): 404–7.
47. Angiogenesis Foundation, „Understanding Angiogenesis“, http://www.angio.org/understanding/content_understanding.html; L. K. Lassiter und M. A. Carducci, „Endothelin Receptor Antagonists in the Treatment of Prostate Cancer“, *Seminars in Oncology* 30.5 (Oktober 2003): 678–88. Eine Erklärung des Prozesses findet sich auf der Webseite des National Cancer Institute, „Understanding Angiogenesis“, <http://press2.nci.nih.gov/sciencebehind/angiogenesis/angio02.htm>.
48. I. B. Roninson, „Tumor Cell Senescence in Cancer Treatment“, *Cancer Research* 63.11 (1. Juni 2003): 2705–15; B. R. Davies et al., „Immortalization of Human Ovarian Surface Epithelium with Telomerase and Temperature-Sensitive SV40 Large T Antigen“, *Experimental Cell Research* 288.2 (15. August 2003): 390–402.
49. Siehe auch R. C. Woodruff und J. N. Thompson Jr., „The Role of Somatic and Germline Mutations in Aging and a Mutation Interaction Model of Aging“, *Journal of Anti-Aging Medicine* 6.1 (Frühjahr 2003): 29–39. Siehe auch Anmerkung 18 und 19.

50. Aubrey D. N. J. de Grey, „The Reductive Hotspot Hypothesis of Mammalian Aging: Membrane Metabolism Magnifies Mutant Mitochondrial Mischief“, *European Journal of Biochemistry* 269.8 (April 2002): 2003–9; P. F. Chinnery et al., „Accumulation of Mitochondrial DNA Mutations in Ageing, Cancer, and Mitochondrial Disease: Is There a Common Mechanism?“ *Lancet* 360.9342 (26. Oktober 2002): 1323–25; A. D. de Grey, „Mitochondrial Gene Therapy: An Arena for the Biomedical Use of Inteins“, *Trends in Biotechnology* 18.9 (September 2000): 394–99.
51. „Der Begriff einer ‚Impfung‘ von Personen gegen neurodegenerative Erkrankungen wie der Alzheimerschen Krankheit widerspricht klar der klassischen Vorstellung von Mechanismen und Behandlungsmöglichkeiten, und trotzdem konnten therapeutische Impfungen sowohl gegen Alzheimer als auch gegen Multiple Sklerose in Tierversuchen bestätigt werden und befinden sich derzeit in klinischen Tests. Solche Behandlungen können sowohl unerwünschte Entzündungserscheinungen als auch eine Besserung hervorrufen.“ (H. L. Weiner und D. J. Selkoe, „Inflammation and Therapeutic Vaccination in CNS Diseases“, *Nature* 420.6917 [19.–26. Dezember 2002]: 879–84). Diese Forscher zeigten, dass eine Impfung in Form von Nasentropfen die Gehirnschädigung durch Alzheimer verlangsamen kann. H. L. Weiner et al., „Nasal Administration of Amyloid-beta Peptide Decreases Cerebral Amyloid Burden in a Mouse Model of Alzheimer’s Disease“, *Annals of Neurology* 48.4 (Oktober 2000): 567–79.
52. S. Vasan, P. Foiles und H. Founds, „Therapeutic Potential of Breakers of Advanced Glycation End Product-Protein Crosslinks“, *Archives of Biochemistry and Biophysics* 419.1 (1. November 2003): 89–96; D. A. Kass, „Getting Better Without AGE: New Insights into the Diabetic Heart“, *Circulation Research* 92.7 (18. April 2003): 704–6.
53. S. Graham, „Methuselah Worm Remains Energetic for Life“, 27. Oktober 2003, www.sciam.com/article.cfm?

[chanID=sa003&articleID=000C601F-8711-1F99-86FB83414B7F0156](#).

54. Ron Weiss' Webseite bei der Princeton University (<http://www.princeton.edu/~rweiss>) listet seine Publikationen auf, unter anderem „Genetic Circuit Building Blocks for Cellular Computation, Communications, and Signal Processing“, *Natural Computing, an International Journal* 2.1 (Januar 2003): 47–84.
55. S. L. Garfinkel, „Biological Computing“, *Technology Review* (Mai–Juni 2000), <http://static.highbeam.com/t/technologyreview/may012000/biologicalcomputing>.
56. Ebd. Siehe auch die Liste aktueller Projekte auf der Seite des MIT Media Lab, <http://www.media.mit.edu/research/index.html>.
57. Eine mögliche Erklärung: „Bei Säugetieren verfügen weibliche Embryonen über zwei X-Chromosomen und männliche über eins. Während der frühen Entwicklung sind bei Weibchen normalerweise eines der X-Chromosomen und die meisten seiner Gene deaktiviert. Dadurch ist die Genexpression bei Männchen und Weibchen gleich. In geklonten Tieren ist jedoch eines der X-Chromosomen des Spender-Zellkerns bereits deaktiviert. Es muss reprogrammiert und später wieder deaktiviert werden, was eine gewisse Fehleranfälligkeit nach sich zieht. CBC News online staff, „Genetic Defects May Explain Cloning Failures“, 27. Mai 2002, http://www.cbc.ca/stories/2002/05/27/cloning_errors020527. Bzgl. F. Xue et al., „Aberrant Patterns of X Chromosome Inactivation in Bovine Clones“, *Nature Genetics* 31.2 (Juni 2002): 216–20.
58. Rick Weiss, „Clone Defects Point to Need for 2 Genetic Parents“, *Washington Post*, 10. Mai 1999, <http://www.gene.ch/genet/1999/Jun/msg00004.html>.
59. A. Baguisi et al., „Production of Goats by Somatic Cell Nuclear Transfer“, *Nature Biotechnology* 5 (Mai 1999): 456–61. Für mehr Informationen über die Zusammenarbeit zwischen Genzyme

Transgenics Corporation, der Louisiana State University und der Tufts University School of Medicine, aus der diese Arbeit hervorging, siehe Pressemitteilung vom 27. April 1999, „Genzyme Transgenics Corporation Announces First Successful Cloning of Transgenic Goat“, <http://www.transgenics.com/pressreleases/pr042799.html>.

60. Luba Vangelova, „True or False? Extinction Is Forever“, *Smithsonian*, Juni 2003, http://www.smithsonianmag.com/smithsonian/issues03/jun03/pheno_mena.html.
61. J. B. Gurdon und A. Colman, „The Future of Cloning“, *Nature* 402.6763 (16. Dezember 1999): 743–46; Gregory Stock und John Campbell, eds., *Engineering the Human Germline: An Exploration of the Science and Ethics of Altering the Genes We Pass to Our Children* (New York: Oxford University Press, 2000).
62. Das Scripps Research Institute erklärt: „Die Fähigkeit zur Dedifferenzierung, also ausdifferenzierte Zellen in pluripotente Stammzellen zurückzuverwandeln, könnte viele Hindernisse umgehen, denen man in der klinischen Anwendung von Stammzellen von Embryos oder Erwachsenen begegnet (ineffiziente Differenzierung, Abstoßung fremder Zellen, etc.). Mit effizienter Dedifferenzierung wäre es möglich, gesunde und leicht zugängliche Zellen von erwachsenen Personen einzusetzen, um verschiedene Arten funktionaler Zellen zu generieren oder beschädigtes Gewebe oder Organe zu reparieren.“ (<http://www.scripps.edu/chem/ding/sciences.htm>).

Die direkte Umwandlung eines differenzierten Zelltyps in einen anderen – man spricht von Transdifferenzierung – wäre hilfreich bei der Erzeugung isogener (körpereigener) Zellen um kranke oder beschädigte Zellen oder Gewebe zu ersetzen. Stammzellen von Erwachsenen haben ein größeres Differenzierungspotenzial als bislang vermutet und sind auch für andere Gewebearten als die, der sie entstammen, tauglich. Daher könnten sie von therapeutischem Wert sein. Es gibt einige Fortschritte bezüglich Transdifferenzierung, unter anderem durch Zellkerntransplantation, Manipulation von Zellkulturparametern, Expression ekotopischer Gene und Aufnahme von Molekülen aus Zellextrakten. Diese Ansätze eröffnen neue Möglichkeiten für die Erzeugung isogener Ersatzzellen. Um

unvorhersehbare Gewebeumwandlungen zu vermeiden, erfordert die Reprogrammierung des Zellkerns gezielte und vererbare epigenetische Veränderungen. Es wird noch viel Arbeit kosten, molekulare Prozesse zu identifizieren, die es ermöglichen, den Zellkern zu reprogrammieren und die Veränderungen zu stabilisieren.

Zitiert aus P. Collas und Anne-Marl Hakelien, „Teaching Cells New Tricks“, *Trends in Biotechnology* 21.8 (August 2003): 354–61; P. Collas, „Nuclear Reprogramming in Cell-Free Extracts“, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, B 358.1436 (29. August 2003): 1389–95.

63. Umwandlung menschlicher Leberzellen in Bauchspeicheldrüsenzellen im Labor: Jonathan Slack et al., „Experimental Conversion of Liver to Pancreas“, *Current Biology* 13.2 (Januar 2003): 105–15. Forscher programmierten durch Zellextrakte Zellen um, sodass sie sich wie andere Zellarten verhielten, beispielsweise wurden Hautzellen Eigenschaften von T-Zellen verliehen. Anne-Mari Hakelien et al., „Reprogramming Fibroblasts to Express T-Cell Functions Using Cell Extracts“, *Nature Biotechnology* 20.5 (Mai 2002): 460–66; Anne-Mari Hakelien und P. Collas, „Novel Approaches to Transdifferentiation“, *Cloning Stem Cells* 4.4 (2002): 379–87. Siehe auch David Tosh und Jonathan M. W. Slack, „How Cells Change Their Phenotype“, *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 3.3 (März 2002): 187–94.
64. Siehe Beschreibung von Transkriptionsfaktoren in Anmerkung 21.
65. R. P. Lanza et al., „Extension of Cell Life-Span and Telomere Length in Animals Cloned from Senescent Somatic Cells“, *Science* 288.5466 (28. April 2000): 66–9. Siehe auch J. C. Ameisen, „On the Origin, Evolution, and Nature of Programmed Cell Death: A Timeline of Four Billion Years“, *Cell Death and Differentiation* 9.4 (April 2002): 367–93; Mary-Ellen Shay, „Transplantation Without a Donor“, *Dream: The Magazine of Possibilities* (Children’s Hospital, Boston), Herbst 2001.
66. Im Jahr 2000 kündigte das Immune Tolerance Network (<http://www.immunetolerance.org>), ein Projekt des National Institutes of Health (NIH) und der Juvenile Diabetes Foundation,

eine klinische Studie über die Effektivität von Inselzellentransplantation an.

Aus dem Abschlussbericht einer klinischen Studie (James Shapiro, „Campath-1H and One-Year Temporary Sirolimus Maintenance Monotherapy in Clinical Islet Transplantation“, <http://www.immunetolerance.org/public/clinical/islet/trials/shapiro2.html>): „Selbst bei ausreichendem Inselzellenvorrat ist diese Therapie nicht für alle Typ-1-Diabetes-Patienten geeignet, aufgrund des potenziellen langfristigen Krebsrisikos, lebensbedrohlicher Infektionen und Nebenwirkungen der Immunsuppression. Könnte man eine Tolerierung [dauerhafte Funktionalität des Transplantats ohne ständige Einnahme von Medikamenten, welche die Abstoßung verhindern] bei minimalem Risiko erreichen, so könnte Inselzellentransplantation schon in frühen Phasen der Krankheit und auch schon zum Zeitpunkt der Diagnose bei Kindern eingesetzt werden.“

67. „Lab Grown Steaks Nearing Menu“, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993208>, enthält auch technische Details.
68. Die Halbwertszeit von Strukturgrößen in allen Dimensionen beträgt fünf Jahre. Siehe Diskussion am Ende von **Kapitel 2**.
69. Die Untersuchungen von Robert A. Freitas Jr. ergeben, dass es ausreichen würde, 10 Prozent der roten Blutkörperchen eines Menschen durch Respirozyten zu ersetzen, damit dieser vier Stunden lang den Atem anhalten könnte – 240 Mal länger als die Zeitspanne, die man mit rein biologischem Blut ohne Luft auskommt (etwa eine Minute). Da dabei die Respirozyten nur ein Zehntel des Bluts ausmachten, müssten sie folglich Tausende Male effizienter sein.
70. Nanotechnik ist „vollständige, leicht erschwingliche Kontrolle über die Struktur von Materie durch die Steuerung von jedem einzelnen Molekül in Produkten und Nebenprodukten; den Produkten und

Verfahren molekularer Fertigung, einschließlich molekularer Maschinen“. (Eric Drexler und Chris Peterson, *Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution* [New York: William Morrow, 1991]). Die Autoren:

Jahrtausende lang hat sich die Technik in Richtung größerer Kontrolle über die Struktur von Materie entwickelt. [...] Bisherige Hochtechnologie – Mikrowellenröhren, Laser, Supraleiter, Satelliten, Roboter und dergleichen – kamen bislang in kleinen Mengen aus unseren Fabriken getropft, zunächst zu hohen Preisen und mit kleinen Anwendungsbereichen. Mit der molekularen Fertigung dagegen wird es sich eher wie mit den Computern verhalten: eine flexible Technik mit einem breiten Anwendungsspektrum. Molekulare Fertigung wird nicht wie Computer tröpfchenweise in Fabriken produziert werden; sie wird die Fabriken ersetzen und deren Produkte ersetzen oder verbessern. Das ist eine grundlegende Neuerung, keine weitere Spielerei aus dem zwanzigsten Jahrhundert. Sie wird ein Ergebnis der wissenschaftlichen Entwicklungen des zwanzigsten Jahrhunderts sein, doch sie wird die bisherigen Entwicklungsverläufe in Technik, Wirtschaft und in Sachen Umwelt durchbrechen. [Kap. 1]

Drexler und Peterson skizzieren die Auswirkungen dieser Revolution: effiziente Solarzellen „billig wie Zeitung und zäh wie Asphalt“, molekulare Mechanismen, die Grippeviren innerhalb von sechs Stunden eliminieren und sich dann auflösen, Immunmaschinen, die bösartige Zellen im Körper auf Knopfdruck zerstören, Taschensupercomputer, Ablösung fossiler Energiequellen, Raumfahrt und Wiederbelebung ausgestorbener Spezies. Siehe auch Drexler, *Engines of Creation* (New York: Anchor Books, 1986). Das Foresight Institute hat eine nützliche Liste von FAQs zur Nanotechnik (<http://www.foresight.org/NanoRev/FIFAQ1.html>). Weitere Informationen im Netz bieten die National Nanotechnology Initiative (<http://www.nano.gov>), <http://nanotechweb.org>, Dr. Ralph Merckles Nanotechnik-Seite (<http://www.zyvex.com/nano>) und *Nanotechnology*, ein Onlinemagazin (<http://www.iop.org/EJ/journal/0957-4484>). Umfangreiche Materialien zu Nanotechnik bietet auch die Webseite des Autors unter <http://www.kurzweilAI.net/meme/frame.html?m=18>.

71. Richard P. Feynman, „There's Plenty of Room at the Bottom“, Jahresversammlung der American Physical Society, Pasadena,

California, 1959; Transkript auf
<http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.

72. John von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, A. W. Burks, ed. (Urbana: University of Illinois Press, 1966).
73. Das umfangreichste Werk über kinematische maschinelle Reproduktion ist Robert A. Freitas Jr. und Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines* (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004),
<http://www.MolecularAssembler.com/KSRM.htm>.
74. K. Eric Drexler, *Engines of Creation* und K. Eric Drexler, *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation* (New York: Wiley Interscience, 1992).
75. Siehe Besprechung von Nanoschaltungen in **Kapitel 3** und Untersuchung des Potenzials von Nanoschaltungen in Anmerkung 9 jenes Kapitels.
76. K. Eric Drexler und Richard E. Smalley, „Nanotechnology: Drexler and Smalley Make the Case for and Against ‚Molecular Assemblers‘“, *Chemical and Engineering News*, 30. November 2003,
<http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>.
77. Ralph C. Merkle, „A Proposed ‚Metabolism‘ for a Hydrocarbon Assembler“, *Nanotechnology* 8 (Dezember 1997): 149–62,
<http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/8/4/001> oder
<http://www.zyvex.com/nanotech/hydroCarbonMetabolism.html>.
Siehe auch Ralph C. Merkle, „Binding Sites for Use in a Simple Assembler“, *Nanotechnology* 8 (1997): 23–28,
<http://www.zyvex.com/nanotech/bindingSites.html>; Ralph C. Merkle, „A New Family of Six Degree of Freedom Positional Devices“, *Nanotechnology* 8 (1997): 47–52,
<http://www.zyvex.com/nanotech/6dof.html>; Ralph C. Merkle, „Casing an Assembler“, *Nanotechnology* 10 (1999): 315–22,
<http://www.zyvex.com/nanotech/casing>; Robert A. Freitas Jr., „A

Simple Tool for Positional Diamond Mechanosynthesis, and Its Method of Manufacture“, U.S. Provisional Patent Application No. 60/543,802, eingereicht am 11. Februar 2004, beschrieben auf <http://www.MolecularAssembler.com/Papers/PathDiamMolMfg.htm> ; Ralph C. Merkle und Robert A. Freitas Jr., „Theoretical Analysis of a Carbon-Carbon Dimer Placement Tool for Diamond Mechanosynthesis“, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 3 (August 2003): 319–24, <http://www.rfreitas.com/Nano/JNNDimerTool.pdf>; Robert A. Freitas Jr. und Ralph C. Merkle, „Merkle-Freitas Hydrocarbon Molecular Assembler; in *Kinematic Self-Replicating Machines*, Abschnitt 4.11.3 (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004), S. 130–35, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/4.11.3.htm>.

78. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities*, Abschnitt 6.3.4.5, „Chemoelectric Cells“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 152–54, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.5.htm>; Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities*, Abschnitt 6.3.4.4, „Glucose Engines“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 149–52, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.4.htm>; K. Eric Drexler, *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation*, Abschnitt 16.3.2, „Acoustic Power and Control“ (New York: Wiley Interscience, 1992), S. 472–76. Siehe auch Robert A. Freitas Jr. und Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines*, Appendix B.4, „Acoustic Transducer for Power and Control“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004), S. 225–33, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/AppB.4.htm>.
79. Die wohl umfassendste Sammlung solcher Ideen findet sich in Robert A. Freitas Jr. und Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines*, **Kapitel 4**, „Microscale and Molecular Kinematic Machine Replicators“ (Georgetown, Tex.: Landes

Bioscience, 2004), S. 89–144,
<http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/4.htm>.

80. Drexler, *Nanosystems*, S. 441.
81. Die wohl umfassendste Sammlung solcher Ideen findet sich in Robert A. Freitas Jr. und Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines*, **Kapitel 4**, „Microscale and Molecular Kinematic Machine Replicators“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004), S. 89–144,
<http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/4.htm>.
82. T. R. Kelly, H. De Silva und R. A. Silva, „Unidirectional Rotary Motion in a Molecular System“, *Nature* 401.6749 (9. September 1999): 150–52.
83. Carlo Montemagno and George Bachand, „Constructing Nanomechanical Devices Powered by Biomolecular Motors“, *Nanotechnology* 10 (1999): 225–31; George D. Bachand und Carlo D. Montemagno, „Constructing Organic/Inorganic NEMS Devices Powered by Biomolecular Motors“, *Biomedical Microdevices* 2.3 (Juni 2000): 179–84.
84. N. Koumura et al., „Light-Driven Monodirectional Molecular Rotor“, *Nature* 401.6749 (9. September 1999): 152–55.
85. Berkeley Lab, „A Conveyor Belt for the Nano-Age“, 28. April 2004, <http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/MSD-conveyor-belt-for-nanoage.html>.
86. „Study: Self-Replicating Nanomachines Feasible“, 2. Juni 2004, http://www.smalltimes.com/document_display.cfm?section_id=53&document_id=8007, bzgl. Tihamer Toth-Pejel, „Modeling Kinematic Cellular Automata“, 30. April 2004, http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/pdf/883Toth-Fejel.pdf.
87. W. U. Dittmer, A. Reuter und F. C. Simmel, „A DNA-Based Machine That Can Cyclically Bind and Release Thrombin“,

Angewandte Chemie International Edition 43 (2004): 3550–53.

88. Shiping Liao und Nadrian C. Seeman, „Translation of DNA Signals into Polymer Assembly Instructions“, *Science* 306 (17. Dezember 2004): 2072–74,
<http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/306/5704/2072.pdf>.
89. Scripps Research Institute, „Nano-origami“, 11. Februar 2004,
http://www.eurekalert.org/pub_releases/2004-02/sri-n021004.php.
90. Jenny Hogan, „DNA Robot Takes Its First Steps“, 6. Mai 2004,
<http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994958>, bzgl.
Nadrian Seeman und William Sherman, „A Precisely Controlled DNA Biped Walking Device“, *Nano Letters* 4.7 (Juli 2004): 1203–7.
91. Helen Pearson, „Construction Bugs Find Tiny Work“, *Nature News*,
11. Juli 2003,
<http://www.nature.com/news/2003/030707/full/030707-9.html>.
92. Richard E. Smalley, „Nanofallacies: Of Chemistry, Love and Nanobots“, *Scientific American* 285.3 (September 2001): 76–77;
http://www.sciamdigital.com/browse.cfm?sequencenameCHAR=item2&methodnameCHAR=resource_getitembrowse&interfacenameCHAR=browse.cfm&ISSUEID_CHAR=6A628AB3-17A5-4374-B100-3185A0CCC86&ARTICLEID_CHAR=F90C4210-C153-4B2F-83A1-28F2012B637&sc=I100322 (Anmeldung erforderlich).
93. Siehe Referenzen in Anmerkung 108 und 109. Drexlers Vorschläge finden sich in Drexler, *Nanosystems*. Einige Arbeiteten, die Drexler bestätigen: Xiao Yan Chang, Martin Perry, James Peploski, Donald L. Thompson und Lionel M. Raff, „Theoretical Studies of Hydrogen-Abstraction Reactions from Diamond and Diamondlike Surfaces“, *Journal of Chemical Physics* 99 (15. September 1993): 4748–58. Siehe auch L. J. Lauhon und W. Ho, „Inducing and Observing the Abstraction of a Single Hydrogen Atom in Bimolecular Reaction with a Scanning Tunneling Microscope“, *Journal of Physical Chemistry* 105 (2000): 3987–92; G. Allis und

K. Eric Drexler, „Design and Analysis of a Molecular Tool for Carbon Transfer in Mechanosynthesis“, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 2.1 (März–April 2005, im Druck).

94. Lea Winerman, „How to Grab an Atom“, *Physical Review Focus*, 2. Mai 2003, <http://focus.aps.org/story/v11/st19>, bzgl. Noriaki Oyabu, „Mechanical Vertical Manipulation of Selected Single Atoms by Soft Nanoindentation Using a Near Contact Atomic Force Microscope“, *Physical Review Letters* 90.17 (2. Mai 2003): 176102.
95. Robert A. Freitas Jr., „Technical Bibliography for Research on Positional Mechanosynthesis“, Webseite des Foresight Institute, 16. Dezember 2003, <http://foresight.org/stage2/mechsynthbib.html>.
96. Siehe Gleichungen und Erklärung auf S. 3 in Ralph C. Merkle, „That’s Impossible! How Good Scientists Reach Bad Conclusions“, <http://www.zyvex.com/nanotech/impossible.html>.
97. „ ΔX_c beträgt somit lediglich $\sim 5\%$ des typischen Durchmessers der atomaren Elektronenwolke von ~ 0.3 nm, was bedeutet, dass die zusätzliche Beeinträchtigung von Fabrikation und Stabilität nanomechanischer Strukturen nur gering ist. Selbst am Siedepunkt können sich die meisten Moleküle lediglich um $\sim 0,7$ nm von ihrer mittleren Position wegbewegen.“ Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities*, Abschnitt 2.1, „Is Molecular Manufacturing Possible?“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 39, <http://www.nano-medicine.com/NMI/2.1.htm#p9>.
98. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities*, Abschnitt 6.3.4.5, „Chemoelectric Cells“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 152–54, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.5.htm>
99. Montemagno und Bachand, „Constructing Nanomechanical Devices Powered by Biomolecular Motors.“

100. Offener Brief des Foresight-Vorsitzenden K. Eric Drexler an Nobelpreisträger Richard Smalley, <http://www.foresight.org/NanoRev/Letter.html>, oder auch: <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0560.html>. Die komplette Geschichte ist nachzulesen in Ray Kurzweil, „The Drexler-Smalley Debate on Molecular Assembly“, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0604.html>.
101. K. Eric Drexler und Richard E. Smalley, „Nanotechnology: Drexler and Smalley Make the Case for and Against ‚Molecular Assemblers‘“, *Chemical & Engineering News* 81.48 (1. Dezember 2003): 37–42, <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>.
102. A. Zaks und A. M. Klibanov, „Enzymatic Catalysis in Organic Media at 100 Degrees C“, *Science* 224.4654 (15. Juni 1984): 1249–51.
103. Patrick Bailey, „Unraveling the Big Debate About Small Machines“, *BetterHumans*, 16. August 2004, <http://www.betterhumans.com/Features/Reports/report.aspx?articleID=2004-08-16-1>.
104. Charles B. Musgrave et al., „Theoretical Studies of a Hydrogen Abstraction Tool for Nanotechnology“, *Nanotechnology* 2 (Oktober 1991): 187–95; Michael Page und Donald W. Brenner, „Hydrogen Abstraction from a Diamond Surface: Ab initio Quantum Chemical Study with Constrained Isobutane as a Model“, *Journal of the American Chemical Society* 113.9 (1991): 3270–74; Xiao Yan Chang, Martin Perry, James Peploski, Donald L. Thompson und Lionel M. Raff, „Theoretical Studies of Hydrogen-Abstraction Reactions from Diamond and Diamond-like Surfaces“, *Journal of Chemical Physics* 99 (15. September 1993): 4748–58; J. W. Lyding, K. Hess, G. C. Abeln, et al., „UHV-STM Nanofabrication and

Hydrogen/Deuterium Desorption from Silicon Surfaces: Implications for CMOS Technology“, *Applied Surface Science* 132 (1998): 221; <http://www.hersam-group.northwestern.edu/publications.html>; E. T. Foley et al., „Cryogenic UHV-STM Study of Hydrogen and Deuterium Desorption from Silicon(100)“, *Physical Review Letters* 80 (1998): 1336–39, http://prola.aps.org/abstract/PRL/v80/i6/p1336_1; L. J. Lauhon und W. Ho, „Inducing and Observing the Abstraction of a Single Hydrogen Atom in Bimolecular Reaction with a Scanning Tunneling Microscope“, *Journal of Physical Chemistry* 105 (2000): 3987–92.

105. Stephen P. Walch und Ralph C. Merkle, „Theoretical Studies of Diamond Mechanosynthesis Reactions“, *Nanotechnology* 9 (September 1998): 285–96; Fedor N. Dzegilenko, Deepak Srivastava und Subhash Saini, „Simulations of Carbon Nanotube Tip Assisted Mechano-Chemical Reactions on a Diamond Surface“, *Nanotechnology* 9 (Dezember 1998): 325–30; Ralph C. Merkle und Robert A. Freitas Jr., „Theoretical Analysis of a Carbon-Carbon Dimer Placement Tool for Diamond Mechanosynthesis“, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 3 (August 2003): 319–24, <http://www.rfreitas.com/Nano/DimerTool.htm>; Jingping Peng, Robert A. Freitas Jr. und Ralph C. Merkle, „Theoretical Analysis of Diamond Mechano-Synthesis. Part I. Stability of C₂ Mediated Growth of Nanocrystalline Diamond C(110) Surface“, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 1 (März 2004): 62–70, <http://www.molecularassembler.com/JCTNPengMar04.pdf>; David J. Mann, Jingping Peng, Robert A. Freitas Jr. und Ralph C. Merkle, „Theoretical Analysis of Diamond MechanoSynthesis. Part II. C₂ Mediated Growth of Diamond C(110) Surface via Si/Ge-Triadamantane Dimer Placement Tools“, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 1 (März 2004), 71–80, <http://www.molecularassembler.com/JCTNMann-Mar04.pdf>.

106. An der Analyse der Wasserstoffabspaltung und der Kohlenstoffanlagerung waren viele Menschen beteiligt, darunter: Donald W. Brenner, Tahir Cagin, Richard J. Colton, K. Eric Drexler, Fedor N. Dzegilenko, Robert A. Freitas Jr., William A. Goddard III, J. A. Harrison, Charles B. Musgrave, Ralph C. Merkle, Michael Page, Jason K. Perry, Subhash Saini, O. A. Shenderova, Susan B. Sinnott, Deepak Srivastava, Stephen P. Walch und Carter T. White.
107. Ralph C. Merkle, „A Proposed ‚Metabolism‘ for a Hydrocarbon Assembler“, *Nanotechnology* 8 (Dezember 1997): 14–62, <http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/8/4/001> oder <http://www.zyvex.com/nanotech/hydroCarbonMetabolism.html>.
108. Eine Liste nützlicher Quellen: Robert A. Freitas Jr., „Technical Bibliography for Research on Positional Mechanosynthesis“, Webseite des Foresight Institute, 16. Dezember 2003, <http://foresight.org/stage2/mechsynthbib.html>; Wilson Ho und Hyojune Lee, „Single Bond Formation and Characterization with a Scanning Tunneling Microscope“, *Science* 286.5445 (26. November 1999): 1719–22, <http://www.physics.uci.edu/~wilsonho/stm-iets.html>; K. Eric Drexler, *Nanosystems*, Kapitel 8; Ralph Merkle, „Proposed ‚Metabolism‘ for a Hydrocarbon Assembler“; Musgrave et al., „Theoretical Studies of a Hydrogen Abstraction Tool for Nanotechnology“; Michael Page und Donald W. Brenner, „Hydrogen Abstraction from a Diamond Surface: Ab initio Quantum Chemical Study with Constrained Isobutane as a Model“, *Journal of the American Chemical Society* 113.9 (1991): 3270–74; D. W. Brenner et al., „Simulated Engineering of Nanostructures“, *Nanotechnology* 7 (September 1996): 161–67, <http://www.zyvex.com/nanotech/nano4/brennerPaper.pdf>; S. P. Walch, W. A. Goddard III und Ralph Merkle, „Theoretical Studies of Reactions on Diamond Surfaces“, Fifth Foresight Conference on Molecular Nanotechnology, 1997, <http://www.foresight.org/Conferences/MNT05/Abstracts/Walcabst.html>; Stephen P. Walch und Ralph C. Merkle, „Theoretical Studies of

Diamond Mechano-synthesis Reactions“, *Nanotechnology* 9 (September 1998): 285–96; Fedor N. Dzegilenko, Deepak Srivastava und Subhash Saini, „Simulations of Carbon Nanotube Tip Assisted Mechano-Chemical Reactions on a Diamond Surface“, *Nanotechnology* 9 (Dezember 1998): 325–30; J. W. Lyding et al., „UHV-STM Nanofabrication and Hydrogen/Deuterium Desorption from Silicon Surfaces: Implications for CMOS Technology“, *Applied Surface Science* 132 (1998): 221, <http://www.hersam-group.northwestern.edu/publications.html>; E. T. Foley et al., „Cryogenic UHV-STM Study of Hydrogen and Deuterium Desorption from Silicon(100)“, *Physical Review Letters* 80 (1998): 1336–39, http://prola.aps.org/abstract/PRL/v80/i6/p1336_1; M. C. Hersam, G. C. Abeln und J. W. Lyding, „An Approach for Efficiently Locating and Electrically Contacting Nanostructures Fabricated via UHV-STM Lithography on Si(100)“, *Microelectronic Engineering* 47 (1999): 235–37; L. J. Lauhon und W. Ho, „Inducing and Observing the Abstraction of a Single Hydrogen Atom in Bimolecular Reaction with a Scanning Tunneling Microscope“, *Journal of Physical Chemistry* 105 (2000): 3987–92, <http://www.physics.uci.edu/~wilsonho/stm-iets.html>.

109. Eric Drexler, „Drexler Counters“, erstveröffentlicht auf KurzweilAI.net am 1. November 2003: <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0606.html>. Siehe auch K. Eric Drexler, *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation* (New York: Wiley Interscience, 1992), **Kapitel 8**; Ralph C. Merkle, „Foresight Debate with Scientific American“ (1995), <http://www.foresight.org/SciAmDebate/SciAmResponse.html>; Wilson Ho und Hyojune Lee, „Single Bond Formation and Characterization with a Scanning Tunneling Microscope“, *Science* 286.5445 (26. November 1999): 1719–22, <http://www.physics.uci.edu/~wilsonho/stm-iets.html>; K. Eric Drexler, David Forrest, Robert A. Freitas Jr., J. Storrs Hall, Neil

Jacobstein, Tom McKendree, Ralph Merkle und Christine Peterson, „On Physics, Fundamentals, and Nanorobots: A Rebuttal to Smalley's Assertion that Self-Replicating Mechanical Nanorobots Are Simply Not Possible: A Debate About Assemblers“ (2001), <http://www.imm.org/SciAmDebate2/smalley.html>.

110. Siehe:

<http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>;
[http://www.kurzweilAI.net/meme/frame.html?
main=/articles/art0604.html](http://www.kurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0604.html)?

111. D. Maysinger et al., „Block Copolymers Modify the Internalization of Micelle-Incorporated Probes into Neural Cells“, *Biochimica et Biophysica Acta* 1539.3 (20. Juni 2001): 205–17; R. Savic et al., „Micellar Nanocontainers Distribute to Defined Cytoplasmic Organelles“, *Science* 300.5619 (25. April 2003): 615–18.

112. T. Yamada et al., „Nanopartides for the Delivery of Genes and Drugs to Human Hepatocytes“, *Nature Biotechnology* 21.8 (August 2003): 885–90. Elektronisch veröffentlicht am 29. Juni 2003. Abstract: [http://www.nature.com/cgi-taf/DynaPage.taf?
file=/nbt/journal/v21/n8/abs/nbt843.html](http://www.nature.com/cgi-taf/DynaPage.taf?file=/nbt/journal/v21/n8/abs/nbt843.html). Kurze Pressemitteilung von Nature: http://www.nature.com/nbt/press_release/nbt0803.html.

113. Richards Grayson et al., „A BioMEMS Review: MEMS Technology for Physiologically Integrated Devices“, *IEEE Proceedings* 92 (2004): 6–21; Richards Grayson et al., „Molecular Release from a Polymeric Microreservoir Device: Influence of Chemistry, Polymer Swelling, and Loading on Device Performance“, *Journal of Biomedical Materials Research* 69A.3 (1. Juni 2004): 502–12.

114. D. Patrick O'Neal et al., „Photo-thermal Tumor Ablation in Mice Using Near Infrared-Absorbing Nanoparticles“, *Cancer Letters* 209.2 (25. Juni 2004): 171–76.

115. International Energy Agency, aus einer Präsentation von R. E. Smalley, „Nanotechnology, the S&T Workforce, Energy & Prosperity“, S. 12, vorgestellt im PCAST (President's Council of

Advisors on Science and Technology), Washington, D.C., 3. März 2003, http://www.ostp.gov/PCAST_IPCAST%203-3-03%20R%20Smalley%20Slides.pdf; auch unter <http://cohesion.rice.edu/NaturalSciences/Smalley/emplibrary/PCAST%20March%203,%202003.ppt>.

116. Smalley, „Nanotechnology, the S&T Workforce, Energy & Prosperity.“
117. „FutureGen—A Sequestration and Hydrogen Research Initiative“, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, Februar 2003, http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/futuregen/futuregen_factsheet.pdf.
118. Drexler, *Nanosystems*, S. 428, 433.
119. Barnaby J. Feder, „Scientist at Work/Richard Smalley: Small Thoughts for a Global Grid“, *New York Times*, 2. September 2003; <http://query.nytimes.com/gst/abstract.html?res=F30C17FC3D5C0C718CDDA00894DB404482> (Mitgliedschaft oder Bezahlung erforderlich).
120. International Energy Agency, from Smalley, „Nanotechnology, the S&T Workforce, Energy & Prosperity“, S. 12.
121. American Council for the United Nations University, Millennium Project Global Challenge 13: <http://www.acunu.org/millennium/ch-13.html>.
122. „Wireless Transmission in Earth's Energy Future“, Environment News Service, 19. November 2002, bzgl. Jerome C. Glenn und Theodore J. Gordon in „2002 State of the Future“, American Council for the United Nations University (August 2002).
123. Anmerkung: Der Autor ist Berater und Investor dieses Unternehmens.
124. „NEC Unveils Methanol-Fueled Laptop“, Associated Press, 30. Juni 2003,

<http://www.siliconvalley.com/mld/siliconvalley/news/6203790.htm>.
bzgl. Pressemitteilung von NEC, „NEC Unveils Notebook PC with Built-In Fuel Cell“, 30. Juni 2003, <http://www.nec.co.jp/press/en/0306/3002.html>.

125. Tony Smith, „Toshiba Boffins Prep Laptop Fuel Cell“, *The Register*, 5. März 2003, http://www.theregister.co.uk/2003/03/05/toshiba_boffins_prep_laptop_fuel; Yoshiko Hara, „Toshiba Develops Matchbox-Sized Fuel Cell for Mobile Phones“, *EE Times*, 24. Juni 2004, <http://www.eet.com/article/showArticle.jhtml?articleId=22101804>, bzgl. Pressemitteilung von Toshiba, „Toshiba Announces World’s Smallest Direct Methanol Fuel Cell with Energy Output of 100 Milliwatts“, http://www.toshiba.com/taec/press/dmfc04_222.shtml.
126. Karen Lurie, „Hydrogen Cars“, *ScienceCentral News*, 13. Mai 2004, http://www.sciencentral.com/articles/view.php3?language=english&type=article&article_id=21839_2247.
127. Louise Knapp, „Booze to Fuel Gadget Batteries“, *Wired News*, 2. April 2003, <http://www.wired.com/news/gizmos/0,1452,58119,00.html>, und Pressemitteilung der St. Louis University, „Powered by Your Liquor Cabinet, New Biofuel Cell Could Replace Rechargeable Batteries“, 24. März 2003, <http://www.slu.edu/readstory/newsinfo/2474>, bzgl. Nick Akers und Shelley Minter, „Towards the Development of a Membrane Electrode Assembly“, präsentiert bei der nationalen Versammlung der American Chemical Society, Anaheim, Calif. (2003).
128. „Biofuel Cell Runs on Metabolic Energy to Power Medical Implants“, *Nature Online*, 12. November 2002, <http://www.nature.com/news/2002/021111/full/021111-1.html>, bzgl. N. Mano, F. Mao und A. Heller, „A Miniature Biofuel Cell Operating in a Physiological Buffer“, *Journal of the American Chemical Society* 124 (2002): 12962–63.

129. „Power from Blood Could Lead to ‚Human Batteries‘“, *FairfaxDigital*, 4. August 2003, <http://www.smh.com.au/articles/2003/08/03/1059849278131.html?oneclick=true>. Mehr über mikrobielle Brennstoffzellen: <http://www.geobacter.org/research/microbial/>. Diagramme einer Mikro-Bio-Brennstoffzelle von Matsuhiko Nishizawas BioMEMs Labor: http://www.biomems.mech.tohoku.ac.jp/research_e.html. Ein kurzer Artikel über eine implantierbare, ungiftige Energiequelle, die nunmehr 0,2 Watt produziert: http://www.iol.co.za/index.php?se_id=1&click_id=31&art_id=qw111596760144B215.
130. Mike Martin, „Pace-Setting Nanotubes May Power Micro-Devices“, *NewsFactor*, 27. Februar 2003, <http://physics.iisc.ernet.in/~asood/Pace-Setting%20Nanotubes%20May%20Power%20Micro-Devices.htm>.
131. „Letztlich lässt sich aus der globalen Energiebilanz ein Limit für die Gesamtmasse aktiver Nanobots auf der Erde ableiten. Die gesamte Sonneneinstrahlung auf der Erde beläuft sich auf $\sim 1,75 \times 10^{17}$ Watt ($I_{\text{Erde}} \sim 1370 \text{ W/m}^2 \pm 0.4\%$ bei normaler Einstrahlung)“, Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, Basic Capabilities, section 6.5.7, „Global Hypsithermal Limit“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 175–76, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.5.7.htm#p1>.
132. Ausgehend von 10 Milliarden (10^{10}) Menschen, einer Energiedichte der Nanobots von etwa 10^7 Watt pro Kubikmeter, einem Nanobotvolumen von einem Kubikmikrometer und einem Energieverbrauch von 10 Pikowatt (10^{-11} Watt) pro Nanobot. Mit der hypsithermalen Grenze von 10^{16} Watt ergibt das 10 Kilogramm Nanobots pro Person. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities*, Abschnitt 6.5.7 „Global Hypsithermal Limit“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 175–76, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.5.7.htm#p4>.

133. Alternativ kann Nanotechnik extrem effizient gestaltet werden, sodass das Auffangen von Energie unnötig und auch schwierig wäre, weil kaum Wärme entstünde, die man auffangen könnte. In privater Korrespondenz (Januar 2005) schreibt Robert A. Freitas Jr.: „Drexler (Nanosystems: 396) schreibt, dass die Wärmedissipation theoretisch nur $\text{Ediss} \sim 0.1 \text{ MJ/kg}$ betrage könnte, „wenn man die Entwicklung einer Reihe mechanochemischer Prozesse voraussetzt, die Moleküle des Rohmaterials durch zuverlässige, nahezu reversible Schritte in komplexe Produktstrukturen umwandeln“. 0.1 MJ/kg Diamant entspricht in etwa dem minimalen Wärmerauschen bei Raumtemperatur (z.B. $kT \sim 4 \text{ zJ/atom}$ bei 298 K).“
134. Alexis De Vos, *Endoreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion* (London: Oxford University Press, 1992), S. 103.
135. R. D. Schaller und V. I. Klimov, „High Efficiency Carrier Multiplication in PbSe Nanocrystals: Implications for Solar Energy Conversion“, *Physical Review Letters* 92.18 (7. Mai 2004): 186601.
136. National Academies Press, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications, *Harnessing Light: Optical Science and Engineering for the 21st Century*, (Washington, D.C.: National Academy Press, 1998), S. 166, <http://books.nap.edu/books/0309059917/html/166.html>.
137. Matt Marshall, „World Events Spark Interest in Solar Cell Energy Startups“, *Mercury News*, 15. August 2004, http://www.konarkatech.com/news_articles_082004/b-silicon_valley.php and <http://www.nanosolar.com/cache/merc081504.htm>.
138. John Gartner, „NASA Spaces on Energy Solution“, *Wired News*, 22. Juni 2004, <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,63913,00.html>. Siehe auch Arthur Smith, „The Case for Solar Power from Space“, <http://www.lispace.org/articles/SSPCase.html>.

139. „The Space Elevator Primer“, Spaceward Foundation, <http://www.elevator2010.org/site/primer.html>.
140. Kenneth Chang, „Experts Say New Desktop Fusion Claims Seem More Credible“, *New York Times*, 3. März 2004, <http://www.rpi.edu/web/News/nytlahey3.html>, bzgl. R. P. Taleyarkhan, „Additional Evidence of Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation“, *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 69.3, pt. 2 (März 2004): 036109.
141. Die ursprüngliche Idee für kalte Fusion im Kleinformaat nach Pons und Fleischman ist nicht gestorben. Leidenschaftliche Anhänger haben die Bemühungen um diese Technik nicht aufgegeben – 2004 kündigte das Department of Energy eine neue formale Bestandsaufnahme der Fortschritte auf diesem Gebiet an. Toni Feder, „DOE Warms to Cold Fusion“, *Physics Today* (April 2004), <http://www.physicstoday.org/vol-57/iss-4/p27.html>.
142. Akira Fujishima, Tata N. Rao und Donald A. Tryk, „Titanium Dioxide Photocatalysis“, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Review* 1 (29. Juni 2000): 1–21; Prashant V. Kamat, Rebecca Huehn und Roxana Nicolaescu, „A ‚Sense and Shoot‘ Approach for Photocatalytic Degradation of Organic Contaminants in Water“, *Journal of Physical Chemistry B* 106 (31. Januar 2002): 788–94.
143. A. G. Panov et al., „Photooxidation of Toluene and p-Xylene in Cation-Exchanged Zeolites X, Y, ZSM-5, and Beta: The Role of Zeolite Physicochemical Properties in Product Yield and Selectivity“, *Journal of Physical Chemistry B* 104 (22. Juni 2000): 5706–14.
144. Gabor A. Somorjai und Keith McCrea, „Roadmap for Catalysis Science in the 21st Century: A Personal View of Building the Future on Past and Present Accomplishments“, *Applied Catalysis A: General* 222.1–2 (2001): 3–18, Lawrence Berkeley National Laboratory number 3.LBNL48555,

<http://www.cchem.berkeley.edu/~gasgrp/2000.html> (publication 877). Siehe auch Zhao, Lu und Millar, „Advances in mesoporous molecular sieve MCM-41“, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 35 (1996): 2075–90, http://cheed.nus.edu.sg/~chezxs/Zhao/publication/1996_2075.pdf.

145. NTSC/NSET Bericht, *National Nanotechnology Initiative: The Initiative and Its Implementation Plan*, Juli 2000, <http://www.nano.gov/html/res/nni2.pdf>.
146. Wei-xian Zhang, Chuan-Bao Wang und Hsing-Lung Lien, „Treatment of Chlorinated Organic Contaminants with Nanoscale Bimetallic Particles“, *Catalysis Today* 40 (14. Mai 1988): 387–95.
147. R. Q. Long und R. T. Yang, „Carbon Nanotubes as Superior Sorbent for Dioxin Removal“, *Journal of the American Chemical Society* 123.9 (2001): 2058–59.
148. Robert A. Freitas, Jr. „Death Is an Outrage!“ präsentiert bei der Fifth Alcor Conference on Extreme Life Extension, Newport Beach, California, 16. November 2002, <http://www.rfreitas.com/Nano/DeathIsAnOutrage.htm>.
149. Beispiel: fünfte jährliche BIOMEMS-Konferenz, Juni 2003, San Jose, <http://www.knowledgepress.com/events/11201717.htm>.
150. Die ersten beiden Bände einer geplanten vierbändigen Reihe: Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. I, *Basic Capabilities* (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999); *Nanomedicine*, Bd. IIA, *Biocompatibility* (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2003); <http://www.nanomedicine.com>.

151. Robert A. Freitas Jr., „Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell“, *Artificial Cells, Blood Substitutes, and Immobilization Biotechnology* 26 (1998): 411–30, <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Respirocytes.html>.
152. Robert A. Freitas Jr., „Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes using Digest and Discharge Protocol“, Zyvex Neuauflage, März 2001, <http://www.rfreitas.com/Nano/Microbivores.htm>; Robert A. Freitas Jr., „Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes“, *Foresight Update* Nr. 44, 31. März 2001, S. 11–13, <http://www.imm.org/Reports/Rep025.html>; siehe auch microbivore images at the Nanomedicine Art Gallery, <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Gallery/Species/Microbivores.html>.
153. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. I, *Basic Capabilities*, Abschnitt 9.4.2.5 „Nanomechanisms for Natation“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 309–12, <http://www.nanomedicine.com/NMI/9.4.2.5.htm>.
154. George Whitesides, „Nanoinspiration: The Once and Future Nanomachine“, *Scientific American* 285.3 (16. September 2001): 78–83.
155. „Nach Einsteins Approximation der Brown'schen Bewegung diffundiert ein Wassermolekül in flüssigem Zustand innerhalb einer Sekunde im Schnitt um ~50 Mikrometer (~400.000 Moleküldurchmesser), während ein 1-Mikrometer-Nanoroboter in derselben Flüssigkeit im selben Zeitraum um nur ~0,7 Mikrometer (~0,7 seines Durchmessers) bewegt wird. Die Brown'sche Bewegung ist folglich nur ein geringer Störfaktor bei der Navigation beweglicher medizinischer Nanoroboter.“ Siehe K. Eric Drexler et al., „Many Future Nanomachines: A Rebuttal to Whitesides' Assertion That Mechanical Molecular Assemblers Are Not

Workable and Not a Concern“, eine Debatte über Assembler, Institute for Molecular Manufacturing, 2001, <http://www.imm.org/SciAmDebate2/whitesides.html>.

156. Tejal A. Desai, „MEMS-Based Technologies for Cellular Encapsulation“, *American Journal of Drug Delivery* 1.1 (2003): 3–11, Abstract unter <http://www.ingentaconnect.com/search/expand?pub=infobike://adis/add/2003/00000001/00000001/art00001>.
157. Zitiert nach Douglas Hofstadter in *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (New York: Basic Books, 1979).
158. Der Autor betreibt das Unternehmen FATKAT (Financial Accelerating Transactions by Kurzweil Adaptive Technologies), welches automatische Mustererkennung auf Finanzdaten anwendet, um über Börseninvestitionen zu entscheiden, <http://www.FatKat.com>.
159. Siehe die Diskussion von Preis-Leistungs-Steigerungen von Computerspeichern und Elektronik im Allgemeinen in **Kapitel 2**.
160. KI außer Kontrolle (im Englischen: „Runaway AI“) bezeichnet ein Szenario, in dem, wie Max More schreibt, „ursprünglich im Dienste der Menschheit stehende superintelligente *Maschinen* uns bald hinter sich lassen“. Max More, „Embrace, Don’t Relinquish, the Future“, <http://www.KurzweilAI.net/articles/art0106.html?printable=1>. Siehe auch Damien Brodericks Beschreibung der „Keim-KI“: „Eine sich selbst verbessernde Keim-KI könnte auf einer schneckenlangsamen Maschine laufen. Der Punkt ist, solange sie in der Lage ist sich selbst zu verbessern, wird sie dies mit allen Mitteln tun, alle Engpässe der Rechnerarchitektur durchbrechen und ihre eigene, verbesserte Hardware konzipieren und möglicherweise sogar herstellen (falls ihr Zugang zur Steuerung einer Fabrik gewährt wird).“ Damien Broderick, „Tearing Toward the Spike“, präsentiert bei „Australia at the Crossroads? Scenarios and Strategies for the Future“ (31. April–2. Mai 2000), veröffentlicht auf KurzweilAI.net am 7. Mai 2001,

<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0173.html>.

161. David Talbot, „Lord of the Robots“, *Technology Review* (April 2002).
162. Heather Havenstein schreibt: „Von Science-Fiction-Autoren vermittelte, überzeichnete Vorstellungen von der Konvergenz von Mensch und Maschine haben in den 1980ern das Ansehen von KI befleckt, da die KI diese Erwartungen nicht erfüllen konnte.“ Heather Havenstein, „Spring Comes to AI Winter: A Thousand Applications Bloom in Medicine, Customer Service, Education and Manufacturing“, *Computerworld*, 14. Februar 2005, <http://www.computerworld.com/softwaretopics/software/story/0,10801,99691,00.html>. Dieses befleckte Ansehen führte zum KI Winter, definiert als „von Richard Gabriel geprägte Bezeichnung für das auf einen Boom in den 1980ern folgende (circa 1990–94?) Abebben der Begeisterungswelle für KI-Sprachen wie Lisp sowie für KI selbst.“ Duane Rettig schreibt: „[...] Unternehmen schwammen auf der großen KI-Welle der frühen 80er mit, als große Konzerne Milliarden von Dollar in den KI-Hype pumpen, der denkende Maschinen innerhalb von 10 Jahren versprach. Als diese Ziele sich als problematischer erwiesen, als ursprünglich angenommen, brach die KI-Welle ein und Lisp mit ihr, aufgrund seiner Verbundenheit mit KI. Wir bezeichnen das als den KI-Winter.“ Duane Rettig zitiert in „AI Winter“, <http://c2.com/cgi/wiki?AiWinter>.
163. Das 1957 geschriebene General Problem Solver (GPS) Programm konnte Probleme anhand von Regeln lösen, die dem GPS erlaubten, das Problem in Unterprobleme zu zerlegen und zu prüfen, ob das Lösen eines jeweiligen Unterproblems den GPS näher an die Lösung des ursprünglichen Problems bringen würde. In den frühen 1960ern schrieb Thomas Evan ANALOGY, ein „Programm, das geometrische Analogie-Aufgaben der Form A:B::C:? aus IQ-Tests und College-Aufnahmeprüfungen löst.“ Boicho Kokinov und Robert M. French, „Computational Models of Analogy-Making“, in L.

Nadel, ed., *Encyclopedia of Cognitive Science*, Bd. 1 (London: Nature Publishing Group, 2003), S. 113–18. Siehe auch A. Newell, J. C. Shaw und H. A. Simon, „Report on a General Problem-Solving Program“, *Proceedings of the International Conference on Information Processing* (Paris: UNESCO House, 1959), S. 256–64; Thomas Evans, „A Heuristic Program to Solve Geometric-Analogy Problems“, in M. Minsky, ed., *Semantic Information Processing* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1968).

164. Sir Arthur Conan Doyle, „The Red-Headed League“, 1890, verfügbar unter <http://www.eastoftheweb.com/short-stories/UBooks/RedHead.shtml>.
165. V. Yu et al., „Antimicrobial Selection by a Computer: A Blinded Evaluation by Infectious Diseases Experts“, *JAMA* 242.12 (1979): 1279–82.
166. Gary H. Anthes, „Computerizing Common Sense“, *Computerworld*, 8. April 2002, <http://www.computerworld.com/news/2002/story/0,11280,69881,00.html>.
167. Kristen Philipkoski, „Now Here’s a Really Big Idea“, *Wired News*, 25. November 2002, <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,56374,00.html>, bzgl. Darryl Macer, „The Next Challenge Is to Map the Human Mind“, *Nature* 420 (14. November 2002): 121; siehe auch Projektbeschreibung auf <http://www.biol.tsukuba.ac.jp/~macer/index.html>.
168. Thomas Bayes, „An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances“, veröffentlicht 1763, zwei Jahre nach seinem Tod (1761).
169. SpamBayes Spamfilter, <http://spambayes.sourceforge.net>.
170. Lawrence R. Rabiner, „A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition“, *Proceedings of the*

IEEE 77 (1989): 257–86. Für eine mathematische Besprechung von Markov-Modellen siehe <http://jedlik.phy.bme.hu/~gerjanos/HMM/node2.html>.

171. Kurzweil Applied Intelligence (KAI), vom Autor 1982 gegründet, wurde 1997 für \$100 Millionen verkauft und ist heute Teil von ScanSoft (ehemals Kurzweil Computer Products, das erste Unternehmen des Autors, das 1980 an Xerox verkauft wurde). KAI brachte 1987 das erste kommerzielle Spracherkennungssystem mit großem Vokabular auf den Markt (Kurzweil Voice Report mit einem Vokabular von zehntausend Wörtern).
172. Hier ist das algorithmische Schema für neuronale Netze. Viele Variationen sind möglich und der Entwickler muss bestimmte kritische Parameter und Methoden festlegen, die weiter unten beschrieben werden.

Um eine Lösung mit einem neuronalen Netz zu finden, sind folgende Schritte nötig:

- Definiere die Eingabe.
- Definiere die Topologie des neuronalen Netzes (d.h. die Neuronenschichten und die Neuronenverbindungen).
- Trainiere das neuronale Netz mit bekannten Problembeispielen.
- Benutze das trainierte Netz um neue Problembeispiele zu lösen.
- Mache dein KI-Unternehmen öffentlich.

Diese Schritte (außer dem letzten) sind im Folgenden genauer beschrieben:

Eingabe

Die Eingabe für das neuronale Netz besteht in einer Reihe von Zahlen. Zum Beispiel:

- Für visuelle Mustererkennung: ein zweidimensionaler Array von Zahlen, welche die Pixel eines Bildes darstellen.

- Für auditorische Erkennung (z.B. Spracherkennung): ein zweidimensionaler Zahlenarray, der Klangmuster kodiert. Die erste Dimension repräsentiert verschiedene Klangparameter (z.B. Frequenzkomponenten), die zweite Dimension verschiedene Zeitpunkte.
- Für beliebige Mustererkennung: ein n -dimensionaler Array mit Zahlen, der das Eingabe-Muster kodiert.

Topologie

Die Architektur jedes Neurons besteht in:

- Mehreren Eingängen, wobei jeder Eingang entweder mit dem Ausgang eines anderen Neurons oder einer der Eingabe-Zahlen „verbunden“ ist.
- In der Regel einem einzigen Ausgang, der entweder mit dem Eingang eines anderen Neurons (normalerweise in einer höheren Schicht) oder mit dem Netzausgang verbunden ist.

Erstellen der ersten Neuronenschicht

- Erzeuge N_0 Neuronen. „Verbinde“ die verschiedenen Eingänge dieser Neuronen mit „Eingabepunkten“ (sprich Zahlen der Eingabe). Diese Verbindungen können zufällig oder durch einen Evolutionären Algorithmus gewählt werden (siehe unten).
- Weise jeder erstellten Verbindung ein anfängliches „synaptisches Gewicht“ zu. Diese Gewichte können einen einheitlichen Wert haben, zufällig gewählt werden oder auf andere Weise bestimmt werden (siehe unten).

Erstellen der übrigen Neuronenschichten

Erzeuge M Neuronenschichten folgendermaßen. Führe für jede Schicht _{i} folgende Schritte durch:

- Erzeuge N_i Neuronen. „Verbinde“ die verschiedenen Eingänge dieser Neuronen mit den Ausgängen der Neuronen in Schicht _{$i-1$} .

- Weise jeder erstellten Verbindung ein anfängliches „synaptisches Gewicht“ zu. Diese Gewichte können einen einheitlichen Wert haben, zufällig gewählt werden oder auf andere Weise bestimmt werden (siehe unten).
- Die Ausgänge der Neuronen in Schicht_M sind die Ausgänge des Netzes (Variationen siehe unten).

Der Erkennungsvorgang

Funktion der einzelnen Neuronen

In einem Erkennungsversuch verhalten sich die Neuronen folgendermaßen:

- Die gewichteten Eingabewerte des Neurons werden berechnet, das heißt, der Wert an jedem Eingang (also der Ausgangswert eines anderen Neurons oder eine Zahl aus dem Eingabearray) wird mit dem jeweiligen synaptischen Gewicht multipliziert.
- Diese gewichteten Eingabewerte werden aufsummiert.
- Ist diese Summe größer als die Feuerschwelle des Neurons, so feuert das Neuron, das heißt, seine Ausgabe ist 1. Andernfalls ist die Ausgabe 0. (Variationen siehe unten).

Ablauf eines Erkennungsvorgangs

Führe für jede Schicht, von Schicht₀ bis Schicht_M, folgende Schritte aus:

Für jedes Neuron der Schicht:

- Addiere die gewichteten Eingaben (gewichtete Eingabe = Ausgabe des anderen Neurons [oder Netzeingabe], mit der das Neuron verbunden ist, multipliziert mit dem synaptischen Gewicht dieser Verbindung).
- Ist diese Summe größer als die Feuerschwelle des Neurons, so setze die Ausgabe des Neurons auf 1, andernfalls auf 0.

Training des Neuronalen Netzes

- Führe wiederholte Erkennungsversuche mit Problembeispielen aus.

- Passe nach jedem Versuch die synaptischen Gewichte aller Neuronenverbindungen an, sodass das Ergebnis für das jeweilige Beispiel verbessert wird (unten mehr dazu).
- Fahre mit diesem Training fort, bis die Erfolgsrate des Netzes nicht mehr besser wird (d.h. eine Asymptote erreicht wird).

Wichtige Entscheidungen bei der Konzeption

In dem obenstehenden einfachen Schema muss der Entwickler zunächst folgende Parameter wählen:

- Bedeutung der Eingabezahlen.
- Anzahl an Neuronenschichten.
- Anzahl an Neuronen pro Schicht. (Die Anzahl kann zwischen den Schichten variieren).
- Anzahl an Eingängen pro Neuron. Die Anzahl an Eingängen (d.h. an Neuronenverbindungen) kann von Neuron zu Neuron und von Schicht zu Schicht variieren.
- Die „Verdrahtung“ (d.h. die Verbindungen). Dies ist ein entscheidender Parameter – es gibt verschiedene Möglichkeiten ihn festzulegen:
 - i. Zufällige Verknüpfungen wählen.
 - ii. Die optimalen Verbindungen durch einen Evolutionären Algorithmus bestimmen.
 - iii. Nach eigenem Ermessen wählen.
- Die anfänglichen Synapsengewichte. Es gibt mehrere Möglichkeiten sie festzulegen:
 - i. Alle Gewichte auf einen einheitlichen Wert setzen.
 - ii. Zufällige Werte zuweisen.
 - iii. Die optimalen Anfangswerte durch einen Evolutionären Algorithmus bestimmen.
 - iv. iv. Nach eigenem Ermessen wählen.
- Die Schwellen der Neuronen.
- Den Netzausgang. Dieser kann bestehen in:

- i. den Ausgängen der Neuronen der Schicht_M.
 - ii. dem Ausgang eines einzelnen Neurons, dessen Eingänge die Ausgänge der Neuronen der Schicht_M sind.
 - iii. einer Funktion (z.B. Summe) auf den Ausgaben der Neuronen der Schicht_M.
 - iv. einer anderen Funktion auf den Ausgaben von Neuronen verschiedener Schichten.
- Wie die synaptischen Gewichte des Netzes während des Trainings anzupassen sind. Dies ist ein wichtiger Aspekt, dem sich viele Forschungen und Diskussionen widmen. Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten:
 - i. Erhöhe oder senke jedes Gewicht nach jedem Erkennungsversuch um einen festen (meist kleinen) Betrag, sodass die Netzausgabe dadurch näher an der korrekten Lösung ist. Dies kann erreicht werden, indem man beide Möglichkeiten ausprobiert. Das kostet jedoch Zeit, weshalb andere Methoden entwickelt wurden, um lokal zu entscheiden, ob ein synaptisches Gewicht erhöht oder gesenkt werden muss.
 - ii. Es gibt andere, statistische Methoden, um die synaptischen Gewichte nach einem Erkennungsversuch so anzupassen, dass sich die Antwort des Netzes an die korrekte Antwort annähert. Das Training funktioniert wohlgemerkt auch dann, wenn nicht alle Musterlösungen korrekt sind. Dadurch ist es möglich, Trainingsdaten aus der Praxis zu verwenden, die eine gewisse Fehlerquote aufweisen. Ein wichtiger Erfolgsfaktor für neuronale Netze ist der Umfang der Trainingsdaten. Zumeist ist eine recht große Menge nötig, um befriedigende Ergebnisse zu erhalten. Auch bei neuronalen Netzen macht die Übung den Meister.

Variationen

Zu dem beschriebenen Schema sind viele Variationen möglich:

- Es gibt verschiedene Wege die Topologie festzulegen. Insbesondere können die Neuronenverbindungen entweder zufällig oder durch einen Evolutionären Algorithmus bestimmt werden.

- Es gibt verschiedene Wege, die anfänglichen synaptischen Gewichte zu setzen.
- Die Eingaben für Neuronen der Schicht_i müssen nicht notwendigerweise von Neuronen der Schicht_{i-1} kommen. Sie können auch von einer tieferen oder jeder anderen Schicht kommen.
- Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Netzausgabe zu berechnen.
- Im oben beschriebenen Verfahren feuern die Neuronen nach dem „Alles-oder-Nichts-Prinzip“ (1 oder 0) – das ist eine sogenannte Nichtlinearität. Es können auch andere nichtlineare Funktionen benutzt werden. In der Regel kommen Funktionen zum Einsatz, die schnell, aber etwas gleichmäßiger von 0 zu 1 übergehen. Außerdem sind neben 0 und 1 auch andere Ausgabewerte möglich.
- Ein entscheidender Designparameter ist die Methode, nach welcher im Training die synaptischen Gewichte angepasst werden.

Das obenstehende Schema beschreibt ein „synchrones“ neuronales Netz, in dem die Neuronenaktivität schichtweise nacheinander, von Schicht₀ bis Schicht_M, berechnet wird. In einem echt parallelen System operieren die Neuronen „asynchron“ (das heißt unabhängig voneinander). In einem asynchronen Verfahren überwacht jedes Neuron kontinuierlich seine Eingänge und feuert, wann immer die Summe der gewichteten Eingaben die Schwelle überschreitet.

173. Eine detaillierte Diskussion von Gehirnmodellierung durch Reverse Engineering findet sich in **Kapitel 4**. S. J. Thorpes schreibt beispielsweise: „Wir haben gerade erst mit Arbeiten begonnen, die gewiss der Anfang eines langfristigen Projektes sind, nämlich dem Reverse Engineering des visuellen Systems von Primaten. Bislang haben wir nur einige sehr einfache Architekturen untersucht, praktisch ausschließlich vorwärts gerichtete Architekturen mit relativ wenigen Schichten. [...] In den kommenden Jahren werden wir uns bemühen, möglichst viele Berechnungstricks des visuellen Systems von Menschen und Primaten einzubauen. Mithilfe des „spiking neuron“-Ansatzes wird es bald möglich sein, ausgeklügelte Systeme zu entwickeln, die sehr große neuronale Netze in Echtzeit

simulieren können.“ S. J. Thorpe et al., „Reverse Engineering of the Visual System Using Networks of Spiking Neurons“, *Proceedings of the IEEE 2000 International Symposium on Circuits and Systems IV* (IEEE Press), S. 405–8, <http://www.sccn.ucsd.edu/~arno/mypapers/thorpe.pdf>.

174. T. Schoenauer et al. schreiben: „In den letzten Jahren ist eine große Vielfalt an Hardware für künstliche neuronale Netze (KNN) konzipiert worden. [...] Heute hat man ein breites Spektrum an Hardware für neuronale Netze zur Auswahl. Die unterschiedlichen Konzepte unterscheiden sich hinsichtlich der Architektur, es gibt beispielsweise Neurochips, Beschleunigungskarten und Multi-Board-Neurocomputer, hinsichtlich des Einsatzzwecks des Systems, beispielsweise verschiedener KNN-Algorithmen, als auch hinsichtlich der Vielseitigkeit. [...] Digitale Neurohardware kann klassifiziert werden anhand der Systemarchitektur, des Parallelisierungsgrades, der Lastverteilung, der Prozessorkommunikationsarchitektur und der numerischen Darstellung.“ T. Schoenauer, A. Jahnke, U. Roth und H. Klar, „Digital Neurohardware: Principles and Perspectives“, in *Proc. Neuronale Netze in der Anwendung—Neural Networks in Applications NN'98*, Magdeburg (Februar 1998): 101–6, <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/People/kcamera/neural/papers/schoenauer98digital.pdf>. Siehe auch Yihua Liao, „Neural Networks in Hardware: A Survey“ (2001), <http://ailab.das.ucdavis.edu/~yihua/research/NNhardware.pdf>.
175. Hier ist ein Grundschema für einen Genetischen Algorithmus (bzw. Evolutionären Algorithmus). Viele Variationen sind möglich und der Entwickler muss bestimmte kritische Parameter und Methoden festlegen, die weiter unten beschrieben werden.

DER EVOLUTIONÄRE ALGORITHMUS

Erzeuge N „Lösungsindividuen“. Jedes davon hat:

- Einen genetischen Code: eine Sequenz von Zahlen, die eine mögliche Lösung für das jeweilige Problem beschreibt. Die Zahlen können kritische Parameter, Lösungsschritte, Regeln oder dergleichen darstellen.

Führe für jede Generation der Evolution folgende Schritte aus:

- Führe für jedes der N Individuen folgende Schritte aus:
 - i. Wende die (durch den genetischen Code des Individuums beschriebene) Lösung auf das Problem oder die Simulationsumgebung an.
 - ii. Bewerte die Lösung.
- Wähle die L höchstbewerteten Individuen für die nächste Generation aus.
- Eliminiere die $(N - L)$ übrigen Individuen.
- Erzeuge folgendermaßen $(N - L)$ neue Individuen aus den L überlebenden Individuen:
 - i. Erzeuge Kopien der L überlebenden Individuen. Nimm an jeder Kopie geringfügige Variationen vor; oder
 - ii. Erzeuge neue Individuen durch Vermischung von genetischen Codefragmenten der L überlebenden Individuen (sexuelle Reproduktion); oder
 - iii. Führe eine Kombination aus i. und ii. durch.
- Entscheide, ob die Evolution fortgesetzt wird: Verbesserung = (Höchstwertung der aktuellen Generation) – (Höchstwertung der vorhergehenden Generation). Wir sind fertig, falls Verbesserung < Schwellenwert für Verbesserung.
- Das höchstbewertete Individuum der letzten Generation stellt die beste Lösung dar. Wende die durch den genetischen Code beschriebene Lösung auf das Problem an.

Wichtige Entscheidungen bei der Konzeption

In dem obenstehenden einfachen Schema muss der Entwickler zunächst folgende Parameter wählen:

- Hauptparameter: N und L und Schwellenwert für Verbesserung.
- Die Bedeutung der Zahlen des genetischen Codes und wie aus dem Code die Lösung berechnet wird.
- Das Verfahren, nach dem die N Individuen der ersten Generation zu erzeugen sind. In der Regel reicht es, einigermaßen „sinnvolle“ Lösungskandidaten zu finden. Sind die Anfangslösungen allzu weit von einer guten Lösung entfernt, hat der Algorithmus möglicherweise Schwierigkeiten zu einer guten Lösung zu konvergieren. Oft ist es sinnvoll, mit möglichst unterschiedlichen Individuen zu beginnen. Das kann verhindern, dass der Algorithmus nur ein „lokales“ Lösungsoptimum findet.
- Wie die Lösungen zu bewerten sind.
- Wie die überlebenden Individuen zu reproduzieren sind.

Variationen

Viele Variationen sind möglich. Zum Beispiel:

- Die Anzahl L der überlebenden Individuen muss nicht feststehen, sondern kann den Überlebensregeln entsprechend variieren.
- Die Anzahl (N – L) der neu erzeugten Individuen muss nicht feststehen. Die Reproduktionsregeln können von der Populationsgröße unabhängig sein. Reproduktion kann mit der Bewertung korrelieren, sodass die besten Lösungen sich am stärksten vermehren.
- Die Entscheidung, ob die Evolution zu beenden ist, kann auf unterschiedliche Weise getroffen werden. Dabei können mehrere Individuen (nicht nur das höchstbewertete) einbezogen werden. Zudem können Trends über mehr als nur zwei Generationen berücksichtigt werden.

176. Sam Williams, „When Machines Breed“, 12. August 2004, http://www.salon.com/tech/feature/2004/08/12/evolvable_hardware/index_np.html.
177. Hier ist ein algorithmisches Grundschema für eine rekursive Suche. Viele Variationen sind möglich und der Entwickler muss bestimmte

kritische Parameter und Methoden festlegen, die weiter unten beschrieben werden.

DER REKURSIVE ALGORITHMUS

Definiere eine Funktion (ein Programm) namens „PickBestNextStep“. Die Funktion gibt entweder „SUCCESS“ (das Problem wurde gelöst) oder „FAILURE“ (das Problem wurde nicht gelöst) zurück. Gibt sie „SUCCESS“ zurück, so liefert sie auch die Abfolge von Schritten, die zum Erfolg geführt hat.

PickBestNextStep macht folgendes:

- Feststellen, ob das Programm an diesem Punkt die Rekursion unterbrechen kann. In diesem und den nächsten beiden Punkten geht es um diese Abbruchentscheidung. Stelle zunächst fest, ob das Problem gelöst wurde. Denn da PickBestNextStep sich wahrscheinlich selbst aufgerufen hat, haben wir möglicherweise eine befriedigende Lösung gefunden. Beispiele:
 - i. In einem Spiel (Beispiel Schach): Der letzte Zug führt zum Sieg (Schachmatt).
 - ii. Beim Beweisen eines mathematischen Theorems: Der letzte Schritt vollendet den Beweis.
 - iii. In einem Kunst-Programm (zum Beispiel zur Erzeugung von Poesie oder Musik): Der letzte Schritt erfüllt alle Bedingungen für das nächste Wort oder den nächsten Ton.

Wurde das Problem zufriedenstellend gelöst, gibt das Programm „SUCCESS“ zurück sowie die Schrittfolge, die zum Erfolg führte.

- Wenn das Problem nicht gelöst wurde, prüfe, ob der Lösungsversuch nicht eine Sackgasse ist. Beispiele:
 - i. In einem Spiel (Beispiel Schach): Der letzte Zug führt zur Niederlage (Schachmatt).
 - ii. Beim Beweisen eines mathematischen Theorems: Der letzte Schritt erzeugt einen Widerspruch.

- iii. In einem Kunst-Programm: Der letzte Schritt verletzt die Kriterien für das nächste Wort oder den nächsten Ton.

Wenn die Lösung an diesem Punkt für hoffnungslos befunden wurde, gibt das Programm „FAILURE“ zurück.

- Wenn an diesem Punkt das Problem weder gelöst noch der aktuelle Lösungsversuch für hoffnungslos befunden wurde, entscheide, ob die Rekursion nicht trotzdem abgebrochen werden soll. Dies ist ein wichtiger Konzeptionsaspekt und trägt der Tatsache Rechnung, dass wir nur beschränkte Rechenzeit zur Verfügung haben. Beispiele:
 - i. In einem Spiel (Beispiel Schach): Der letzte Zug führt zu einem ausreichend großen offensichtlichen Vor- oder Nachteil. Dies ist mitunter schwer festzustellen und stellt die größte Herausforderung für den Entwickler dar. Stellt das Programm einen ausreichenden Vorteil fest, so verhält es sich ähnlich wie bei einem Sieg und gibt „SUCCESS“ zurück. Stellt das Programm einen ausreichend großen Nachteil fest, so verhält es sich ähnlich wie bei einer Niederlage und gibt „FAILURE“ zurück.
 - ii. Beim Beweisen eines mathematischen Theorems muss hier festgestellt werden, ob es unwahrscheinlich ist, dass die bisherigen Schritte zu einem erfolgreichen Beweis führen. Falls dem so ist, wird der Ansatz verworfen und PickNextBestStep verhält sich ähnlich wie im Fall, dass der letzte Schritt einen Widerspruch erzeugt, und gibt „FAILURE“ zurück. Es gibt allerdings kein „beinahe bewiesen“, das heißt, wir können nicht „SUCCESS“ zurückgeben, bevor der Beweis vollständig ist. So ist nun mal die Mathematik.
 - iii. In einem Kunst-Programm (zum Beispiel zur Erzeugung von Poesie oder Musik) muss hier entschieden werden, ob es unwahrscheinlich ist, dass die bisherigen Schritte (etwa die Worte eines Gedichts oder die Noten eines Musikstücks) zum gewünschten Ziel führen. Falls dem so ist, wird der Ansatz verworfen und PickNextBestStep verhält sich ähnlich wie im Fall, dass der letzte Schritt die Kriterien verletzt, und gibt „FAILURE“ zurück.

- Falls PickNextBestStep nicht zurückgekehrt ist (weil der aktuelle Lösungsansatz bisher weder erfolgreich noch gescheitert ist und das Programm nicht entschieden hat, die Rekursion zu beenden), so wird die Rekursion fortgeführt. In diesem Fall wird eine Liste der an diesem Punkt möglichen nächsten Schritte erstellt. Hier kommt die genaue Definition des Problems zum Tragen:
 - i. In einem Spiel (Beispiel Schach) sind das alle in der aktuellen Stellung möglichen Züge. Dies erfordert eine exakte Beschreibung der Spielregeln.
 - ii. Beim Beweisen eines Theorems sind hier sämtliche Axiome und bewiesenen Theoreme aufzulisten, die an diesem Punkt des Lösungsweges anwendbar sind.
 - iii. Im Fall eines Kunst-Programms werden sämtliche an diesem Punkt möglichen Worte/Noten/Zeilensegmente aufgelistet.

Für jeden dieser möglichen nächsten Schritte:

- i. Konstruiere die hypothetische Situation, zu welcher dieser Schritt führen würde. In einem Spiel wäre das eine hypothetische Figurenstellung, in einem Beweis bedeutet das, den bisherigen Ansatz um den neuen Schritt (zum Beispiel ein Axiom) zu erweitern, und in einem Kunst-Programm das jeweilige Wort oder die Note einzufügen.
- ii. Rufe PickBestNextStep auf, um die hypothetische Situation zu untersuchen. Hier kommt die Rekursion ins Spiel und das Programm ruft sich selbst auf.
- iii. Falls der rekursive Aufruf von PickBestNextStep „SUCCESS“ zurückgibt, gib ebenfalls „SUCCESS“ zurück. Andernfalls fahre mit dem nächsten möglichen Schritt fort.

Wenn alle möglichen Schritte ausprobiert wurden und der rekursive Aufruf von PickBestNextStep in keinem Fall „SUCCESS“ zurückgegeben hat, gibt „FAILURE“ zurück.

Beendigung von PickBestNextStep

Gibt der ursprüngliche Aufruf von PickBestNextStep „SUCCESS“ zurück, so liefert er ebenfalls die Schrittfolge der erfolgreichen Lösung:

- i. In einem Spiel ist der erste Schritt dieser Sequenz der zu machende Zug.
- ii. Beim Beweisen eines mathematischen Theorems stellt die Sequenz den gesuchten Beweis dar.
- iii. Bei einem Kunst-Programm stellt die Sequenz das fertige Kunstwerk dar.

Gibt der ursprüngliche Aufruf von PickBestNextStep „FAILURE“ zurück, so muss der Entwickler sein Programm nochmals überarbeiten.

Wichtige Entscheidungen bei der Konzeption

Für das obenstehende einfache Schema muss der Entwickler Folgendes festlegen:

- Der Schlüssel zum Erfolg in einem rekursiven Algorithmus ist die Abbruchbedingung. Die Entscheidung ist leicht, wenn das Programm einen klaren Erfolg (zum Beispiel Schachmatt oder die gesuchte Lösung eines mathematischen oder kombinatorischen Problems) erreicht hat oder klar gescheitert ist. Schwieriger wird es, wenn weder Erfolg noch Scheitern eindeutig feststeht. Doch gelegentlich muss die Lösungssuche unterbrochen werden, bevor das Ergebnis feststeht, andernfalls würde das Programm möglicherweise Milliarden von Jahren vor sich hinrechnen (oder bis die Garantie für den Computer abgelaufen ist).
- Die andere Grundvoraussetzung für den rekursiven Algorithmus ist eine exakte formale Beschreibung des Problems. In einem Spiel wie Schach ist das kein Problem. In anderen Fällen ist eine klare Definition nicht immer ganz einfach.

178. Siehe Kurzweil CyberArt, <http://www.KurzweilCyberArt.com> für eine genauere Beschreibung von Ray Kurzweil's Cybernetic Poet und kostenlosen Download des Programms. Siehe U.S. Patent No. 6,647,395, „Poet Personalities“, Erfinder: Ray Kurzweil und John Keklak. Abstract: „Eine Methode zur Erzeugung einer poetischen Persönlichkeit, einschließlich des Vorlesens von Gedichten, Generierung von Analysemodellen, die jeweils ein Gedicht

darstellen, und Speicherung der Analysemodelle in der Persönlichkeitsdatenstruktur. Die Persönlichkeitsdatenstruktur enthält Gewichtungen, die jeweils einem der Analysemodelle zugeordnet sind. Die Gewichtungen bestehen in ganzzahligen Werten.“

179. Ben Goertzel: *The Structure of Intelligence* (New York: Springer-Verlag, 1993); *The Evolving Mind* (Gordon und Breach, 1993); *Chaotic Logic* (Plenum, 1994); *From Complexity to Creativity* (Plenum, 1997). Link zu Ben Goertzels Büchern und Aufsätzen: <http://www.goertzel.org/work.html>.
180. KurzweilAI.net (<http://www.KurzweilAI.net>) bietet Hunderte Artikel von einhundert „großen Denkern“ und andere Beiträge zur „Beschleunigung der Intelligenz“. Die Seite bietet kostenlose tägliche oder wöchentliche Newsletter zu den neuesten Entwicklungen in den in diesem Buch besprochenen Bereichen. Anmeldung mit E-Mail-Adresse auf der Seite. (Adressen werden vertraulich behandelt und nicht weitergegeben).
181. John Gosney, Business Communications Company, „Artificial Intelligence: Burgeoning Applications in Industry“, Juni 2003, <http://www.bccresearch.com/comm/G275.html>.
182. Kathleen Melymuka, „Good Morning, Dave ...“, *Computerworld*; 11. November 2002, <http://www.computerworld.com/industrytopics/defense/story/0,10801,75728,00.html>.
183. JTRS Technology Awareness Bulletin, August 2004, http://jtrs.army.mil/sections/technicalinformation/fset_technical.html?tech_aware_2004-8.
184. Otis Port, Michael Arndt und John Carey, „Smart Tools“, Frühjahr 2003, <http://www.businessweek.com/bw50/content/mar2003/a3826072.htm>.

185. Wade Roush, „Immobots Take Control: From Photocopiers to Space Probes, Machines Injected with Robotic Self-Awareness Are Reliable Problem Solvers“, *Technology Review* (Dezember 2002–Januar 2003), <http://www.occm.de/roush1202.pdf>.
186. Jason Lohn zitiert in einer Pressemitteilung der NASA „NASA ‚Evolutionary‘ Software Automatically Designs Antenna“, http://www.nasa.gov/lb/centers/ames/news/releases/2004/04_55AR.html.
187. Robert Roy Britt, „Automatic Astronomy: New Robotic Telescopes See and Think“, 4. Juni 2003, http://www.space.com/business/technology/technology/automated_astronomy_030604.html.
188. H. Keith Melton, „Spies in the Digital Age“, <http://www.cnn.com/SPECIALS/cold.war/experience/spies/melton.essay>.
189. „United Therapeutics (UT) ist ein Biotechnikunternehmen mit dem Ziel, Therapien für lebensbedrohliche Erkrankungen in drei Bereichen zu entwickeln: Herz- und Gefäßkrankheiten, Krebs und Infektionskrankheiten.“ (<http://www.unither.com>). Kurzweil Technologies arbeitet mit UT an auf Mustererkennung basierenden Analysen von Daten aus „Holter“-Überwachungen (alle vierundzwanzig Stunden) oder „Event“-Untersuchungen (im Abstand von dreißig Tagen und mehr).
190. Kristen Philipkoski, „A Map That Maps Gene Functions“, *Wired News*, 28. Mai 2002, <http://www.wired.com/news/medtech/0,1286,52723,00.html>.
191. Jennifer Ouellette, „Bioinformatics Moves into the Mainstream“, *The Industrial Physicist* (Oktober–November 2003), <http://www.sciencemasters.com/bioinformatics.pdf>.
192. Port, Arndt und Carey, „Smart Tools“.

193. „Protein Patterns in Blood May Predict Prostate Cancer Diagnosis“, National Cancer Institute, 15. Oktober 2002, <http://www.nci.nih.gov/newscenter/ProstateProteomics>, bzgl. Emanuel F. Petricoin et al., „Serum Proteomic Patterns for Detection of Prostate Cancer“, *Journal of the National Cancer Institute* 94 (2002): 1576–78
194. Charlene Laino, „New Blood Test Spots Cancer“, 13. Dezember 2002, <http://my.webmd.com/content/Article/56/65831.htm>; Emanuel F. Petricoin III et al., „Use of Proteomic Patterns in Serum to Identify Ovarian Cancer“, *Lancet* 359.9306 (16. Februar 2002): 572–77.
195. Informationen zu TriPaths FocalPoint: „Make a Diagnosis“, *Wired*, Oktober 2003, <http://www.wired.com/wired/archive/10.03/everywhere.html?pg=5>. Mark Hagland, „Doctors‘ Orders“, Januar 2003, http://www.healthcare-informatics.com/issues/2003/01_03/cpoe.htm.
196. Ross D. King et al., „Functional Genomic Hypothesis Generation and Experimentation by a Robot Scientist“, *Nature* 427 (15. Januar 2004): 247–52.
197. Port, Arndt und Carey, „Smart Tools“.
198. „Future Route Releases AI-Based Fraud Detection Product“, 18. August 2004, <http://www.finextra.com/fullstory.asp?id=12365>.
199. John Hackett, „Computers Are Learning the Business“, *CollectionsWorld*, 24. April 2001, http://www.creditcollectionsworld.com/news/042401_2.htm.
200. „Innovative Use of Artificial Intelligence, Monitoring NASDAQ for Potential Insider Trading and Fraud“, AAAI Pressemitteilung, 30. Juli 2003, <http://www.aaai.org/Pressroom/Releases/release-03-0730.html>.

201. „Adaptive Learning, Fly the Brainy Skies“, *Wired News*, Februar 2002, <http://www.wired.com/wired/archive/10.03/everywhere.html?pg=2>.
202. „Introduction to Artificial Intelligence“, EL 629, Maxwell Air Force Base, Air University Library course, <http://www.au.af.mil/au/aul/school/acsc/ai02.htm>. Sam Williams, „Computer, Heal Thyself“, *Salon.com*, 12. Juli 2004, http://www.salon.com/tech/feature/2004/07/12/self_healing_computing/index_np.html.
203. Siehe <http://www.Seegrid.com>. Anmerkung: Der Autor ist Investor und Vorstandsmitglied von Seegrid.
204. No Hands Across America Webseite, <http://cart.frc.ri.cmu.edu/users/hpm/project.archive/reference.file/nhaa.html> und „Carnegie Mellon Researchers Will Prove Autonomous Driving Technologies During a 3,000 Mile, Hands-off-the- Wheel Trip from Pittsburgh to San Diego“, Carnegie Mellon Pressemitteilung, http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs/user/tjochem/www/nhaa/official_press_release.html; Robert J. Derocher, „Almost Human“, September 2001, <http://www.insight-mag.com/insight/01/09/col-2-pt-1-ClickCulture.htm>.
205. „Search and Rescue Robots“, Associated Press, 3. September 2004, <http://www.smh.com.au/articles/2004/09/02/1093939058792.html?oneclick=true>.
206. „From Factoids to Facts“, *Economist*, 26. August 2004, http://www.economist.com/science/displayStory.cfm?story_id=3127462.
207. Joe McCool, „Voice Recognition, It Pays to Talk“, Mai 2003, <http://www.bcs.org/BCS/Products/Publications/JournalsAndMagazines/ComputerBulletin/OnlineArchive/may03/voicerecognition.htm>.

208. John Gartner, „Finally a Car That Talks Back“, *Wired News*, 2. September 2004, http://www.wired.com/news/autotech/0,2554,64809,00.html?tw=wn_14techhead.
209. „Computer Language Translation System Romances the Rosetta Stone“, Information Sciences Institute, USC School of Engineering (24. Juli 2003), <http://www.usc.edu/isinews/stories/102.html>.
210. Torsten Reil, zitiert in Steven Johnson, „Darwin in a Box“, *Discover* 24.8 (August 2003), <http://www.discover.com/issues/aug-03/departments/feattech/>.
211. „Let Software Catch the Game for You“, 3. Juli 2004, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99996097>.
212. Michelle Delio, „Breeding Race Cars to Win“, *Wired News*, 18. Juni 2004, <http://www.wired.com/news/autotech/0,2554,63900,00.html>.
213. Marvin Minsky, *The Society of Mind* (New York: Simon & Schuster, 1988).
214. Hans Moravec, „When Will Computer Hardware Match the Human Brain?“ *Journal of Evolution and Technology* 1 (1998).
215. Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines* (New York: Viking, 1999), S. 156.
216. Siehe Anmerkungen 22 und 23 in **Kapitel 2** zur International Technology Roadmap for Semiconductors.
217. „The First Turing Test“, <http://www.loebner.net/Prizef/loebner-prize.html>.
218. Douglas R. Hofstadter, „A Coffeehouse Conversation on the Turing Test“, Mai 1981, enthalten in Ray Kurzweil, *The Age of Intelligent Machines* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1990), S. 80–102, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0318.html>.

219. Ray Kurzweil, „Why I Think I Will Win“, and Mitch Kapor, „Why I Think I Will Win“, Regeln:
<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0373.html>; Kapor:
<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0412.html>; Kurzweil:
<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0374.html>; Kurzweil „final word“:
<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0413.html>.
220. Edward A. Feigenbaum, „Some Challenges and Grand Challenges for Computational Intelligence“, *Journal of the Association for Computing Machinery* 50 (Januar 2003): 32–40.
221. Zuzolge der Theorie von der seriellen Endosymbiose in der Eukaryotenentwicklung waren die Vorgänger von Mitochondrien (Organellen menschlicher Zellen, die Energie produzieren und über eigenes Erbgut mit dreizehn Genen verfügen) ursprünglich unabhängige Bakterien (also nicht Teil einer anderen Zelle), ähnlich wie heute Daptobacter-Bakterien. „Serial Endosymbiosis Theory“, <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Serial%20endosymbiosis%20theory>.

Kapitel 6: Die Folgen...

1. Donovan, „Season of the Witch“, *Sunshine Superman* (1966).
2. Zu den Gründen für die Abnahme von Beschäftigung in der Landwirtschaft zählen die Reduktion körperlicher Arbeit durch die Mechanisierung, die ökonomischen Möglichkeiten, die in den Städten während des Zweiten Weltkrieges entstanden, und die Ertragssteigerungen durch Methoden intensiverer Landwirtschaft. U.S. Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service, Trends in U.S. Agriculture,

<http://www.usda.gov/nass/pubs/trends/farmpopulation>. htm. Gründe für den Rückgang von Fabrikarbeit sind unter anderem computergesteuerte Fertigung, effizientere, zeitnahe Produktion, und Produktionsverlagerung ins Ausland. Siehe U.S. Department of Labor, *Futurework: Trends and Challenges of Work in the 21st Century*,

<http://www.dol.gov/asp/programs/history/herman/reports/futurework/report.htm>.

3. Siehe beispielsweise Natasha Vita-More, „The New [Human] Genre Primo [First] Posthuman“, Veröffentlichung für die Ciber@RT Conference, Bilbao, Spanien, April 2004, <http://www.natasha.cc/paper.htm>.

4. Rashid Bashir fasst 2004 zusammen:

Auch bei therapeutischer Mikro- und Nanotechnik gab es viele Fortschritte. Konkrete Beispiele sind unter anderem (i) Silizium-basierte implantierbare Geräte, die per elektrischer Steuerung geöffnet werden und Medikamente freisetzen können, (ii) Siliziumgeräte, mit elektrisch gesteuerten Polymeren ausgestattet, die als Ventil oder Muskel dienen können, um Medikamente freizusetzen, (iii) Silizium-basierte Mikrokapseln mit nanoporösen Membranen zur Verabreichung von Insulin, (iv) vollständig aus Polymeren bestehende Partikel (oder Hydrogele), die Medikamente enthalten können und sich unter bestimmten Bedingungen, beispielsweise pH-Änderungen, ausdehnen und die Medikamente freisetzen, (v) mit Erkennungsproteinen versehene metallische Nanopartikel, die durch externe optische Energie erhitzbar sind und unerwünschte Zellen, Gewebe, etc. lokal erhitzen und zerstören können.

R. Bashir, „BioMEMS: State-of-the-Art in Detection, Opportunities and Prospects“, *Advanced Drug Delivery Reviews* 56.11 (22. September 2004): 1565–86. Erhältlich unter <https://engineering.purdue.edu/LIBNA/pdf/publications/BioMEMS%20review%20ADDR%20final.pdf>. Siehe auch Richard Grayson et al., „A BioMEMS Review: MEMS Technology for Physiologically Integrated Devices“, *IEEE Proceedings* 92 (2004): 6–21.

5. Zu Aktivitäten der International Society for BioMEMS and Biomedical Nanotechnology, siehe <http://www.bme.ohio-state.edu/isb>. BioMEMS Konferenzen sind auf der SPIE Webseite aufgeführt, <http://www.spie.org/Conferences>.

6. Forscher benutzten Gold-Nanoteilchen um den Blutzucker von Diabetikern zu messen. Y. Xiao et al., „Plugging into Enzymes‘: Nanowiring of Redox Enzymes by a Gold Nanoparticle“, *Science* 299.5614 (21. März 2003): 1877–81. Siehe auch T. A. Desai et al., „Abstract Nanoporous Microsystems for Islet Cell Replacement“, *Advanced Drug Delivery Reviews* 56.11 (22. September 2004): 1661–73.
7. A. Grayson, et al., „Multi-pulse Drug Delivery from a Resorbable Polymeric Microchip Device“, *Nature Materials* 2 (2003): 767–72.
8. Q. Bai und K. D. Wise, „Single-Unit Neural Recording with Active Microelectrode Arrays“, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 48.8 (August 2001): 911–20. Siehe Diskussion von Wises Arbeit in J. De- Gaspari, „Tiny, Tuned, and Unattached“, *Mechanical Engineering* (Juli 2001), <http://www.memagazine.org/backissues/july01/features/tinytune/tinytune.html>; K. D. Wise, „The Coming Revolution in Wireless Integrated MicroSystems“, Digest International Sensor Conference 2001 (Invited Plenary), Seoul, Oktober 2001. Online Version (13. Januar 2004): <http://www.stanford.edu/class/ee392s/Stanford392S-kw.pdf>.
9. „Microbots‘ Hunt Down Disease“, *BBC News*, 13. Juni 2001, <http://news.bbc.co.uk/1/hi/health/1386440.stm>. Die Mikromaschinen basieren auf zylinderförmigen Magneten; siehe K. Ishiyama, M. Sendoh und K. I. Arai, „Magnetic Micromachines for Medical Applications“, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 242–45, Teil 1 (April 2002): 41–46.
10. Siehe Pressemitteilung der Sandia National Laboratories, „Pac-Man-Like Microstructure Interacts with Red Blood Cells“, 15. August 2001, <http://www.sandia.gov/medialNewsRel/NR2001/gobbler.htm>. Ein Artikel dazu aus dem Industriebereich: „Microteeth Have a Big Bite“, 17. August 2001, http://www.e4engineering.com/item.asp?ch=e4_home&type=Features&id=42543.

11. Siehe Freitas' Bücher *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities* (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), and *Nanomedicine*, Bd. 2A, *Biocompatibility* (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2003), beide kostenlos verfügbar unter <http://www.nanomedicine.com>. Siehe auch Freitas' „Nanomedicine“-Webseite des Foresight Institutes Robert Freitas, die seine aktuellen Projekte aufführt (<http://www.foresight.org/Nanomedicine/index.html#MedNanoBots>).
12. Robert A. Freitas Jr., „Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell“, *Artificial Cells, Blood Substitutes, and Immobilization Biotechnology* 26 (1998): 411–30, <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Respirocytes.html>.
13. Robert A. Freitas Jr., „Clottocytes: Artificial Mechanical Platelets“, *Foresight Update* Nr. 41, 30. Juni 2000, S. 9–11, <http://www.imm.org/Reports/Rep018.html>.
14. Robert A. Freitas Jr., „Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes“, *Foresight Update* Nr. 44, 31. März 2001, S. 11–13, <http://www.imm.org/Reports/Rep025.html> or <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0453.html>.
15. Robert A. Freitas Jr., „The Vasculoid Personal Appliance“, *Foresight Update* Nr. 48, 31. März 2002, S. 10–12, <http://www.imm.org/Reports/Rep031.html>; komplettes Paper: Robert A. Freitas Jr. und Christopher J. Phoenix, „Vasculoid: A Personal Nanomedical Appliance to Replace Human Blood“, *Journal of Evolution and Technology* 11 (April 2002), <http://www.jetpress.org/volume11/vasculoid.html>.
16. Carlo Montemagno und George Bachand, „Constructing Nanomechanical Devices Powered by Biomolecular Motors“, *Nanotechnology* 10 (September 1999): 225–31; „Biofuel Cell Runs

on Metabolic Energy to Power Medical Implants“, *Nature* online, 12. November 2002, <http://www.nature.com/news/2002/021111/full/021111-1.html>, bzgl. N. Mano, F. Mao und A. Heller, „A Miniature Biofuel Cell Operating in a Physiological Buffer“, *Journal of the American Chemical Society* 124 (2002): 12962–63; Carlo Montemagno et al., „Self-Assembled Microdevices Driven by Muscle“, *Nature Materials* 4.2 (Februar 2005): 180–84, elektronisch veröffentlicht (16. Januar 2005).

17. Für aktuelle Informationen über diese Initiative siehe die Webseite des Lawrence Livermore National Laboratory (<http://www.llnl.gov>) und die Webseite von Medtronic MiniMed Web, <http://www.minimed.com/corpinfo/index.shtml>.

18. „Direkte Gehirn-zu-Gehirn-Kommunikation [...] scheint eher Stoff für Hollywood-Filme zu sein als für Regierungsberichte – doch sie gehört zu den Entwicklungsprognosen in einem kürzlich erstellten Bericht des U.S. National Science Foundation and Department of Commerce.“ G. Brumfiel, „Futurists Predict Body Swaps for Planet Hops“, *Nature* 418 (25. Juli 2002): 359.

Stimulation des inneren Gehirns, bei der elektrischer Strom von implantierten Elektroden die Gehirnfunktion beeinflusst, findet Anwendung in einem FDA-genehmigten Neuroimplantat für Parkinson, das auch für andere neurologische Störungen getestet wird. Siehe Al Abbott, „Brain Implants Show Promise Against Obsessive Disorder“, *Nature* 419 (17. Oktober 2002): 658 und B. Nuttin et al., „Electrical Stimulation in Anterior Limbs of Internal Capsules in Patients with Obsessive-Compulsive Disorder“, *Lancet* 354.9189 (30. Oktober 1999): 1526.

19. Auf der Webseite des Retinal Implant Project (<http://www.bostonretinalimplant.org>) finden sich eine Reihe von Quellen, teilweise jüngeren Datums. Eine davon ist: R. J. Jensen et al., „Thresholds for Activation of Rabbit Retinal Ganglion Cells

with an Ultrafine, Extracellular Microelectrode“, *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 44.8 (August 2003): 3533–43.

20. Die FDA genehmigte das Medtronic-Implantat 1997 nur für eine Gehirnseite; die Genehmigung für beide Seiten wurde am 14. Januar 2002 erteilt. S. Snider, „FDA Approves Expanded Use of Brain Implant for Parkinson’s Disease“, U.S. Food and Drug Administration, *FDA Talk Paper*, 14. Januar 2002, <http://www.fda.gov/bbs/topics/ANSWERS/2002/ANS01130.html>. Die neuesten Versionen erlauben Software-Upgrade von außerhalb des Patienten.
21. Medtronic stellt auch ein Implantat für Zerebralparese her. Siehe S. Hart, „Brain Implant Quells Tremors“, ABC News, 23. Dezember 1997, <http://nasw.org/users/hart/subhtml/abcnews.html>. Siehe auch Medtronic-Webseite, <http://www.medtronic.com>.
22. Gunther Zeck und Peter Fromherz, „Noninvasive Neuroelectronic Interfacing with Synaptically Connected Snail Neurons Immobilized on a Semiconductor Chip“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98.18 (28. August 2001): 10457–62.
23. Siehe R. Colin Johnson, „Scientists Activate Neurons with Quantum Dots“, *EE Times*, 4. Dezember 2001, <http://www.eetimes.com/story/OEG20011204S0068>. Quantenpunkte sind für bildgebende Verfahren einsetzbar; siehe M. Dahan et al., „Diffusion Dynamics of Glycine Receptors Revealed by Single-Quantum Dot Tracking“, *Science* 302.5644 (17. Oktober 2003): 442–45; J. K. Jaiswal und S. M. Simon, „Potentials and Pitfalls of Fluorescent Quantum Dots for Biological Imaging“, *Trends in Cell Biology* 14.9 (September 2004): 497–504.
24. S. Shoham et al., „Motor-Cortical Activity in Tetraplegics“, *Nature* 413.6858 (25. Oktober 2001): 793. Pressemitteilung der University of Utah: „An Early Step Toward Helping the Paralyzed Walk“, 24. Oktober 2001, <http://www.utah.edu/news/releases/01/oct/spinal.html>.

25. Stephen Hawkings Äußerungen, die vom *Focus* falsch übersetzt wurden, werden zitiert in Nick Paton Walsh, „Alter Our DNA or Robots Will Take Over, Warns Hawking“, *Observer*, 2. September 2001,
http://observer.guardian.co.uk/uk_news/story/0,6903,545653,00.html
1. Die weitverbreitete Fehlübersetzung unterstellte, Hawking hätte vor der Entwicklung von übermenschlicher Intelligenz gewarnt. Tatsächlich empfahl er jedoch, die Lücken zwischen biologischer und nichtbiologischer Intelligenz zu schließen. Hawking stellte KurzweilAI.net den exakten Wortlauf zur Verfügung („Hawking Misquoted on Computers Taking Over“, 13. September 2001, http://www.KurzweilAI.net/news/frame.html?main=news_single.html?id%3D495).
26. Siehe Anmerkung 34 in Kapitel 1.
27. Ein Beispiel, Nomad for Military Applications, wurde von Microvision produziert, einem Unternehmen in Bothell, Washington. Siehe <http://www.microvision.com/nomadmilitary/index.html>.
28. Olga Kharif, „Your Lapel Is Ringing“, *Business Week*, 21. Juni 2004.
29. Laila Weir, „High-Tech Hearing Bypasses Ears“, *Wired News*, 16. September 2004, http://www.wired.com/news/technology/0,1282,64963,00.html?tw=wn_tophead_4.
30. Hypersonic Sound technology, http://www.atcsd.com/tl_hss.html; Audio Spotlight, <http://www.holosonics.com/technology.html>.
31. Phillip F. Schewe und Ben Stein, *American Institute of Physics Bulletin of Physics News* 236 (7. August 1995), <http://www.aip.org/enews/physnews/1995/physnews.236.htm>. Siehe auch R. Weis und P. Fromherz, „Frequency Dependent Signal-Transfer in Neuron-Transistors“, *Physical Review E* 55 (1997): 877–89.

32. Siehe Anmerkung 18. Siehe auch J. O. Winter et al., „Recognition Molecule Directed Interfacing Between Semiconductor Quantum Dots and Nerve Cells“, *Advanced Materials* 13 (November 2001): 1673–77; I. Willner and B. Willner, „Biomaterials Integrated with Electronic Elements: En Route to Bioelectronics“, *Trends in Biotechnology* 19 (Juni 2001): 222–30; Deborah A. Fitzgerald, „Bridging the Gap with Bioelectronics“, *Scientist* 16.6 (18 März 2002): 38.
33. Robert Freitas analysiert dieses Szenario: Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities*, Abschnitt 7.4.5.4, „Cell Message Modification“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 194–96, <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.4.5.4.htm#p5> und Abschnitt 7.4.5.6, „Outmessaging to Neurons“, S. 196–97, <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.4.5.6.htm#p2>.
34. Für eine Beschreibung des Ramona-Projekts mit Videos von der Präsentation bei der TED-Konferenz und einem „Making-Of-Video“, siehe „All About Ramona“, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?m=9>.
35. I. Fried et al., „Electric Current Stimulates Laughter“, *Nature* 391.6668 (12. Februar 1998): 650. Siehe Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines* (New York: Viking, 1999).
36. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. 1, *Basic Capabilities*, Abschnitt 7.3, „Communication Networks“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 186–88, <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.3.htm>.
37. Allen Kurzweil, *The Grand Complication: A Novel* (New York: Hyperion, 2002); Allen Kurzweil, *A Case of Curiosities* (New York: Harvest Books, 2001). Allen Kurzweil ist mein Cousin.
38. Zitiert in Aubrey de Grey, „Engineering Negligible Senescence: Rational Design of Feasible, Comprehensive Rejuvenation Biotechnology“, Kronos Institute Seminar Series, 8. Februar 2002.

PowerPoint-Präsentation verfügbar unter
<http://www.gen.cam.ac.uk/sens/sensov.ppt>.

39. Robert A. Freitas Jr., „Death Is an Outrage!“ Vortrag bei der fünften Alcor Conference on Extreme Life Extension, Newport Beach, Calif., 16. November 2002,
<http://www.rfreitas.com/Nano/DeathIsAnOutrage.htm>,
veröffentlicht auf KurzweilAI.net am 9. Januar 2003:
<http://www.KurzweilAI.net/articles/art0536.html>.
40. Cro-magnon, „30 years or less, often much less ...“:
http://anthro.palomar.edu/homo2/sapiens_culture.htm.
Ägypten: Jac J. Janssen zitiert in Brett Palmer, „Playing the Numbers Game“, in *Skeptical Review*, online veröffentlicht am 5. Mai 2004 unter
<http://www.theskepticalreview.com/palmer/numbers.html>.
Europa um 1400: Gregory Clark, *The Conquest of Nature: A Brief Economic History of the World* (Princeton University Press, i. E., 2005), **Kapitel 5**, „Mortality in the Malthusian Era“,
<http://www.econ.ucdavis.edu/faculty/gclark/GlobalHistory/Global%20History-5.pdf>.
1800: James Riley, *Rising Life Expectancy: A Global History* (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2001), S. 32–33.
1900:
<http://www.cdc.gov/nchs/data/ahus/tables/2003/03hus027.pdf>.
41. Das Museum befand sich ursprünglich in Boston und ist nun in Mountain View, Calif. (<http://www.computerhistory.org>).
42. Lyman und Kahle über Langzeitspeicherung: „Während gutes Papier 500 Jahre hält, halten Computerbänder 10 Jahre. Solange für ein regelmäßiges Erstellen von Kopien gesorgt ist, sind unsere Informationen sicher, doch wir haben keinen effektiven Mechanismus um digitales Material 500 Jahre lang zu kopieren. [...]“ Peter Lyman und Brewster Kahle, „Archiving Digital Cultural

Artifacts: Organizing an Agenda for Action“, *D-Lib Magazine*, Juli–August 1998.

Stewart Brand schreibt: „Hinter jedem tollen neuen Computer steht ein ganzer Friedhof ausrangierter Computer, Speichermedien, Programme und Dateien. Science-Fiction-Autor Bruce Sterling beschreibt unsere Zeit als ‚das goldene Zeitalter der toten Medien, die meisten davon mit der Anwendungsdauer einer Packung Twinkles.‘“ Stewart Brand, „Written on the Wind“, *Civilization Magazine*, November 1998 („01998“ in Long Now Terminologie), online verfügbar unter <http://www.longnow.org/10klibrary/library.htm>.

43. Das entsprechende Projekt von DARPA's Information Processing Technology Office heißt LifeLog, <http://www.darpa.mil/ipto/Programs/lifelog>; siehe auch Noah Shachtman, „A Spy Machine of DARPA's Dreams“, *Wired News*, 20. Mai 2003, <http://www.wired.com/news/business/0,1367,58909,00.html>; Gordon Bells project (für Microsoft) heißt MyLifeBits, <http://research.microsoft.com/research/barc/MediaPresence/MyLifeBits.aspx>; zur Long Now Foundation siehe <http://longnow.org>.
44. Bergeron ist Assistant Professor für Anästhesiologie an der Harvard Medical School und Autor von Büchern wie *Bioinformatics Computing*, *Biotech Industry: A Global, Economic, and Financing Overview* und *The Wireless Web and Healthcare*.
45. Die Long Now Foundation entwickelt mit der Rosetta Disk eine mögliche Lösung, um große Textarchive in Sprachen, die in ferner Zukunft in Vergessenheit geraten könnten, aufzubewahren. Das Konzept beruht auf einer einzigartigen Speichertechnik mit 2-Zoll-Nickel-Disketten, die jeweils bis zu 350.000 Seiten speichern können und eine Lebenserwartung von 2.000 bis 10.000 Jahren haben. Siehe Long Now Foundation, Library Ideas, <http://longnow.org/10klibrary/10kLibConference.htm>.

- John A. Parmentola, „Paradigm Shifting Capabilities for Army Transformation“, präsentiert beim SPIE European Symposium on Optics/ Photonics in Security and Defence, 25.–28. Oktober 2004; elektronisch verfügbar bei Bridge 34.3 (Herbst 2004), <http://www.nae.edu/NAE/bridgecom.nsf/weblinks/MKEZ-65RLTA?OpenDocument>.
46. Fred Bayles, „High-tech Project Aims to Make Super-soldiers“, *USA Today*, 23. Mai 2003, http://www.usatoday.com/news/nation/2003-05-22nanotech-usat_x.htm; siehe Webseite des Institute for Soldier Nanotechnologies, <http://web.mit.edu/isn>; Sarah Putnam, „Researchers Tout Opportunities in Nanotech“, MIT News Office, 9. Oktober 2002, <http://web.mit.edu/newsoffice/2002/cdc-nanotech-1009.html>.
47. Ron Schafer, „Robotics to Play Major Role in Future Warfighting“, <http://www.jfcom.mil/newslink/storyarchive/2003/pa072903.htm>; Dr. Russell Richards, „Unmanned Systems: A Big Player for Future Forces?“ Unmanned Effects Workshop des Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Baltimore, 29. Juli – 1. August 2003
48. John Rhea, „NASA Robot in Form of Snake Planned to Penetrate Inaccessible Areas“, *Military and Aerospace Electronics*, November 2000, http://mae.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE_ID=86890.
49. Lakshmi Sandhana, „The Drone Armies Are Coming“, *Wired News*, 30. August 2002, <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,54728,00.html>. Siehe auch Mario Gerla, Kaixin Xu, und Allen Moshfegh, „Minuteman: Forward Projection of Unmanned Agents Using the Airborne Internet“, IEEE Aerospace Conference 2002, Big Sky, Mont., März 2002:

http://www.cs.ucla.edu/NRL/wireless/uploads/mgerla_aerospace02.pdf.

51. James Kennedy und Russell C. Eberhart, mit Yuhui Shi, *Swarm Intelligence* (San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001), <http://www.swarmintelligence.org/SIBook/SI.php>.
52. Will Knight, „Military Robots to Get Swarm Intelligence“, 25. April 2003, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993661>.
53. Ebd.
54. S. R. White et al., „Autonomic Healing of Polymer Composites“, *Nature* 409 (15. Februar 2001): 794–97, <http://www.autonomic.uiuc.edu/files/NaturePaper.pdf>; Kristin Leutwyler, „Self-Healing Plastics“, *ScientificAmerican.com*, 15. Februar 2001, <http://www.sciam.com/article.cfm?articleID=000B307F-C71A-1C5AB882809EC588ED9F>.
55. Sue Baker, „Predator Missile Launch Test Totally Successful“, *Strategic Affairs*, 1. April 2001, <http://www.stratmag.com/issueApril/page02.htm>.
56. Siehe OpenCourseWare-Kursliste unter <http://ocw.mit.edu/index.html>.
57. Brigitte Bouissou, zitiert auf der Webseite zu MIT OpenCourseWare <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Global/AboutOCW/additionalquotes.htm> und Eric Bender, „Teach Locally, Educate Globally“, *MIT Technology Review*, Juni 2004, <http://www.techreview.com/articles/04/06/bender0604.asp?p=1>.
58. Kurzweil Educational Systems (<http://www.Kurzweilededu.com>) vertreibt die Kurzweil3000-Lese-Software für Legastheniker. Das Programm kann jedes Buch vorlesen und zeigt derweil in einer hochauflösenden Abbildung der jeweiligen Seite die Leseposition an. Es umfasst eine Reihe von Werkzeugen zur Verbesserung der Lesefähigkeiten des Benutzers.
59. Zitiert in Natasha Vita-More, „Arterati on Ideas“, <http://64.233.167.104/search?>

[q=cache:QAnJsLcXHXUJ:www.extropy.com/ideas/journal/previous/1998/02-01.html+Arterati+on+ideas&hl=en](http://www.extropy.com/ideas/journal/previous/1998/02-01.html) und <http://www.extropy.com/ideas/journal/previous/1998/02-01.html>.

60. Christine Boese, „The Screen-Age: Our Brains in our Laptops“, CNN. com, 2. August 2004.
61. Thomas Hobbes, *Leviathan* (1651).
62. Seth Lloyd und Y. Jack Ng, „Black Hole Computers“, *Scientific American*, November 2004.
63. Alan M. MacRobert, „The Allen Telescope Array: SETI’s Next Big Step“, *Sky & Telescope*, April 2004, http://skyandtelescope.com/printable/resources/seti/article_256.asp.
64. Ebd.
65. Ebd.
66. C. H. Townes, „At What Wavelength Should We Search for Signals from Extraterrestrial Intelligence?“ *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 80 (1983): 1147–51. S. A. Kingsley in *The Search for Extraterrestrial Intelligence in the Optical Spectrum*, Bd. 2, S. A. Kingsley und G. A. Lemarchand, eds. (1996) Proc. WPIE 2704: 102–16.
67. N. S. Kardashev, „Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations“, *Soviet Astronomy* 8.2 (1964): 217–20. Zusammengefasst in Guillermo A. Lemarchand, „Detectability of Extraterrestrial Technological Activities“, *SETIQuest* 1:1, S. 3–13, <http://www.coseti.org/lemarch1.htm>.
68. Frank Drake und Dava Sobel, *Is Anyone Out There?* (New York: Dell, 1994); Carl Sagan und Frank Drake, „The Search for Extraterrestrial Intelligence“, *Scientific American* (Mai 1975): 80–89. Ein Drake-Gleichung-Rechner findet sich auf http://www.activemind.com/Mysterious/Topics/SETI/drake_equation.html.

69. In vielen Beschreibungen der Drake-Gleichung ist f_L der Anteil der Lebensdauer eines Planeten, in dem Funkübertragungen stattfinden. Doch eine bessere Darstellung ist wahrscheinlich der Anteil an der Lebensdauer des Universums, da uns nicht interessiert, wie lange es den Planeten gibt, sondern wie lange die Funkaktivität andauert.
70. Seth Shostak vermutet „schätzungsweise zwischen 10.000 und einer Millionen Funkapparate in der Galaxie“. Marcus Chown, „ET First Contact ,Within 20 Years‘“, *New Scientist* 183.2457 (24. Juli 2004). Online verfügbar auf http://www.new_scientist.com/article.ns?id=dn6189.
71. T. L. Wilson, „The Search for Extraterrestrial Intelligence“, *Nature*, 22. Februar 2001.
72. Die meisten neueren Schätzungen bewegen sich zwischen zehn und fünfzehn Milliarden Jahren. Schätzungen aus dem Jahr 2002 aufgrund von Daten des Hubble-Teleskops beliefen sich auf dreizehn bis vierzehn Milliarden Jahre. Lawrence Krauss (Western Reserve University) und Brian Chaboyer (Dartmouth University) werteten neue Daten zur Sternentstehung aus und kamen zum Schluss, dass das Alter des Universums mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit zwischen 11,2 Milliarden und 20 Milliarden Jahren liegt. Lawrence Krauss und Brian Chaboyer, „Irion, the Milky Way’s Restless Swarms of Stars“, *Science* 299 (3. Januar 2003): 60–62. Neue Forschungen der NASA grenzen das Alter auf 13,7 Milliarden plus/minus 200 Millionen Jahre ein, http://map.gsfc.nasa.gov/mm/mr_age.html.
73. Zitiert in Eric M. Jones, „Where Is Everybody?‘: An Account of Fermi’s Question“, Los Alamos National Laboratories, März 1985, http://www.bayarea.net/~kins/AboutMe/Fermi_and_Teller/fermi_question.html.
74. In Kapitel 3 haben wir 10^{42} cps für den ultimativen kalten Laptop geschätzt. Die Masse des Sonnensystems entspricht ungefähr der

Sonnenmasse, also 2×10^{30} Kilogramm. Ein zwanzigstel Prozent davon sind 10^{27} Kilogramm. Bei 10^{42} cps pro Kilogramm könnten 10^{27} Kilogramm 10^{69} cps leisten. Gehen wir von 10^{50} cps für den ultimativen heißen Laptop aus, so kommen wir auf 10^{77} cps.

75. Anders Sandberg, „The Physics of Information Processing Superobjects: Daily Life Among the Jupiter Brains“, *Journal of Evolution and Technology* 5 (22. Dezember 1999), <http://www.jetpress.org/volume5/Brains2.pdf>.
76. Freeman John Dyson, „Search for Artificial Stellar Sources of Infrared Radiation“, *Science* 131 (3. Juni 1960): 1667–68.
77. Zitiert in Sandberg, „Physics of Information Processing Superobjects.“
78. Im Jahr 1994 wurden 195,5 Milliarden Halbleiterchips ausgeliefert, im Jahre 2004 dagegen 433,5 Milliarden. Jim Feldhan, Semico Research Corporation, <http://www.semico.com>.
79. Robert Freitas ist ein führender Verfechter von Robotersonden, insbesondere von selbstreplizierenden. Siehe Robert A. Freitas Jr., „Interstellar Probes: A New Approach to SETI“, *J. British Interplanet. Soc.* 33 (März 1980): 95–100, <http://www.rfreitas.com/Astro/Interstellar-ProbesJBIS1980.htm>; Robert A. Freitas Jr., „A Self-Reproducing Interstellar Probe“, *J. British Interplanet. Soc.* 33 (Juli 1980): 251–64, <http://www.rfreitas.com/Astro/ReproJBISJuly1980.htm>; Francisco Valdes und Robert A. Freitas Jr., „Comparison of Reproducing and Nonreproducing Starprobe Strategies for Galactic Exploration“, *J. British Interplanet. Soc.* 33 (November 1980): 402–8, <http://www.rfreitas.com/Astro/ComparisonReproNov1980.htm>; Robert A. Freitas Jr., „Debunking the Myths of Interstellar Probes“, *AstroSearch* 1 (Juli–August 1983): 8–9, <http://www.rfreitas.com/Astro/ProbeMyths1983.htm>; Robert A. Freitas Jr., „The Case for Interstellar Probes“, *J. British Interplanet. Soc.* 36 (November 1983): 490–95,

<http://www.rfreitas.com/Astro/TheCase-ForInterstellarProbes1983.htm>.

80. M. Stenner et al., „The Speed of Information in a ‘Fast-Light’ Optical Medium“, *Nature* 425 (16. Oktober 2003): 695–98. Siehe auch Raymond Y. Chiao et al., „Superluminal and Paraelectric Effects in Rubidium Vapor and Ammonia Gas“, *Quantum and Semiclassical Optics* 7 (1995): 279.
81. I. Marcikic et al., „Long-Distance Teleportation of Qubits at Telecommunication Wavelengths“, *Nature* 421 (Januar 2003): 509–13; John Roach, „Physicists Teleport Quantum Bits over Long Distance“, *National Geographic News*, 29. Januar 2003; Herb Brody, „Quantum Cryptography“; in „10 Emerging Technologies That Will Change the World“, *MIT Technology Review*, Februar 2003; N. Gisin et al., „Quantum Correlations with Moving Observers“, *Quantum Optics* (Dezember 2003): 51; Quantum Cryptography Ausstellung, ITU Telecom World 2003, Geneva, Switzerland, 1. Oktober 2003; Sora Song, „The Quantum Leaper“, *Time*, 15. März 2004; Mark Buchanan, „Light’s Spooky Connections Set New Distance Record“, *New Scientist*, 28. Juni 1997.
82. Charles H. Lineweaver und Tamara M. Davis, „Misconceptions About the Big Bang“, *Scientific American*, März 2005.
83. A. Einstein und N. Rosen, „The Particle Problem in the General Theory of Relativity“, *Physical Review* 48 (1935): 73.
84. J. A. Wheeler, „Geons“, *Physical Review* 97 (1955): 511–36.
85. M. S. Morris, K. S. Thorne und U. Yurtsever, „Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition“, *Physical Review Letters* 61.13 (September 26, 1988): 1446–49; M. S. Morris und K. S. Thorne, „Wormholes in Spacetime and Their Use for Interstellar Travel: A Tool for Teaching General Relativity“, *American Journal of Physics* 56.5 (1988): 395–412.

86. M. Visser, „Wormholes, Baby Universes, and Causality“, *Physical Review D* 41.4 (15. Februar 1990): 1116–24.
87. Sandberg, „Physics of Information Processing Superobjects.“
88. David Hochberg und Thomas W. Kephart, „Wormhole Cosmology and the Horizon Problem“, *Physical Review Letters* 70 (1993): 2665–68, http://prola.aps.org/abstract/PRL/v70/i18/p2665_1; D. Hochberg und M. Visser, „Geometric Structure of the Generic Static Transversable Wormhole Throat“, *Physical Review D* 56 (1997): 4745.
89. J. K. Webb et al., „Further Evidence for Cosmological Evolution of the Fine Structure Constant“, *Physical Review Letters* 87.9 (27. August 2001): 091301; „When Constants Are Not Constant“, *Physics in Action* (Oktober 2001), <http://physicsweb.org/articles/world/14/10/4>.
90. Joao Magueijo, John D. Barrow und Haavard Bunes Sandvik, „Is It c or Is It c ? Experimental Tests of Varying Alpha“, *Physical Letters B* 549 (2002): 284–89.
91. John Smart, „Answering the Fermi Paradox: Exploring the Mechanisms of Universal Transcension“, <http://www.transhumanist.com/Smart-Fermi.htm>. Siehe auch <http://singularitywatch.com> und Smarts Biografie http://www.singularitywatch.com/bio_johnsmart.html.
92. James N. Gardner, *Biocosm: The New Scientific Theory of Evolution: Intelligent Life Is the Architect of the Universe* (Maui: Inner Ocean, 2003).
93. Lee Smolin in „Smolin vs. Susskind: The Anthropic Principle“, *Edge* 145, <http://www.edge.org/documents/archive/edge145.html>; Lee Smolin, „Scientific Alternatives to the Anthropic Principle“, <http://arxiv.org/abs/hep-th/0407213>.
94. Kurzweil, *Age of Spiritual Machines*, S. 258–60.

95. Gardner, *Biocosm*.
96. S. W. Hawking, „Particle Creation by Black Holes“, *Communications in Mathematical Physics* 43 (1975): 199–220.
97. Die Original-Wette findet sich auf http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/info_bet.html. Siehe auch Peter Rodgers, „Hawking Loses Black Hole Bet“, *Physics World*, August 2004, <http://physicsweb.org/articles/news/8/7/11>.
98. Seth Lloyd, „Ultimate Physical Limits to Computation“, *Nature* 406.6799 (31. August 2000): 1047–54. Elektronische Versionen (Version 3 vom 14. Februar 2000) auf <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9908043> (31. August 2000). Folgender Link ist kostenpflichtig: [http://www.nature.com/cgi-
taf/DynaPage.taf?
file=/nature/journal/v406/n6799/full/4061047a0_fs.html&content_filetype=PDF](http://www.nature.com/cgi-
taf/DynaPage.taf?file=/nature/journal/v406/n6799/full/4061047a0_fs.html&content_filetype=PDF).
99. Jacob D. Bekenstein, „Information in the Holographic Universe: Theoretical Results about Black Holes Suggest That the Universe Could Be Like a Gigantic Hologram“, *Scientific American* 289.2 (August 2003): 58–65, [http://www.sciam.com/article.cfm?
articleID=000AF072-4891-1F0A-97AE80A84189EEDF](http://www.sciam.com/article.cfm?articleID=000AF072-4891-1F0A-97AE80A84189EEDF).

Kapitel 7: Ich bin ein Singularitarist

1. In Jay W. Richards et al., *Are We Spiritual Machines? Ray Kurzweil vs. the Critics of Strong A.I.* (Seattle: Discovery Institute, 2002), Einleitung, [http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?
main=/articles/art0502.html](http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0502.html).
2. Ray Kurzweil und Terry Grossman, M.D., *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever* (New York: Rodale Books, 2004).
3. Ebd.
4. Ebd.

5. Max More und Ray Kurzweil, „Max More and Ray Kurzweil on the Singularity“, 26. Februar 2002, <http://www.KurzweilAI.net/articles/art0408.html>.
6. Ebd.
7. Ebd.
8. Arthur Miller, *After the Fall* (New York: Viking, 1964).
9. Aus einem Aufsatz, der 1959 in der Oxford Philosophical Society verlesen und später veröffentlicht wurde als „Minds, Machines and Gödel“, *Philosophy* 36 (1961): 112–27. Die erste und zahlreiche weitere Neuauflagen finden sich in Kenneth Sayre und Frederick Crosson, eds., *The Modeling of Mind* (Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1963), S. 255–71.
10. Martine Rothblatt, „Biocyberethics: Should We Stop a Company from Unplugging an Intelligent Computer?“ 28. September 2003, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0594.html> (mit Links zu einem Webcast und Transkripten).
11. Jaron Lanier, „One Half of a Manifesto“, *Edge*, http://www.edge.org/3rd_culture/lanier/lanier_index.html; siehe auch Jaron Lanier, „One-Half of a Manifesto“, *Wired News*, Dezember 2000, <http://www.wired.com/wired/archive/8.12/lanier.html>.
12. Ebd.
13. Norbert Wiener, *Cybernetics: or, Control and Communication in the Animal and the Machine* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1948).
14. „How Do You Persist When Your Molecules Don’t?“ *Science and Consciousness Review* 1.1 (Juni 2004), <http://www.sci-con.org/articles/20040601.html>.
15. David J. Chalmers, „Facing Up to the Problem of Consciousness“, *Journal of Consciousness Studies* 2.3 (1995): 200–219,

<http://jamaica.u.arizona.edu/~chalmers/papers/facing.html>.

16. Huston Smith, *The Sacred Unconscious*, Videokassette (The Wisdom Foundation, 2001), erwerblich unter <http://www.fonsvitae.com/sacredhuston.html>.
17. Jerry A. Fodor, *RePresentations: Philosophical Essays on the Foundations of Cognitive Science* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1981).

Kapitel 8: Die eng verwobenen Nutzen und Gefahren von GNR

1. Bill McKibben, „How Much Is Enough? The Environmental Movement as a Pivot Point in Human History“, Harvard Seminar on Environmental Values, 18. Oktober 2000.
2. In den 1960ern führte die U.S.-Regierung ein Experiment durch, in welchem sie drei Physikstudenten, die gerade ihren Abschluss erhalten hatten, beauftragten, eine Atombombe allein mithilfe von öffentlich verfügbaren Informationen zu bauen. Das Experiment war erfolgreich: Alle drei Studenten bauten innerhalb von drei Jahren eine Bombe (<http://www.pimall.com/nais/nl/n.nukes.html>). Pläne zur Konstruktion einer Atombombe finden sich im Internet und wurden von einem nationalen Labor in Buchform veröffentlicht. Im Jahr 2002 übergab das britische Verteidigungsministerium Messdaten, Diagramme und detailliertes Informationsmaterial zum Bau von Bomben an das Public Record Office; diese Informationen wurden jedoch wieder entfernt (<http://news.bbc.co.uk/1/hi/uk/1932702.stm>). Die hier angegebenen Links enthalten keine Pläne für den Bau von Atombomben.
3. „The John Stossel Special: You Can’t Say That!“ ABC News, 23. März 2000.

4. Im Netz finden sich massenhaft Informationen, unter anderem militärische Anleitungen zum Bau von Bomben, Waffen und Sprengsätzen. Einige dieser Informationen sind fehlerhaft, doch auch akkurate Informationen sind weiterhin zugänglich – trotz Bemühungen, sie zu entfernen. Der US-Kongress beschloss im Juni 1997 die Änderung (das Feinstein Amendment, SP 419) eines Bewilligungsgesetzes des Verteidigungsministeriums, wodurch die Aushändigung von Bomben-Bauanleitungen verboten wurde. Siehe Anne Marie Helmenstine, „How to Build a Bomb“, 10. Februar 2003, <http://chemistry.about.com/library/weekly/aa021003a.htm>. Informationen zu giftigen Industriechemikalien finden sich im Netz und in Bibliotheken, ebenso Informationen und Equipment zur Kultivierung von Bakterien und Viren sowie Anleitungen zur Programmierung von Viren und zum Hacken von Computern und Netzwerken. Ich führe keine konkreten Beispiele an, um Individuen oder Gruppen mit zerstörerischen Absichten nicht zu unterstützen. Mir ist bewusst, dass ich dies möglicherweise allein durch den Hinweis auf die Verfügbarkeit solcher Informationen tue, doch ich glaube, dass die Vorteile eines offenen Dialogs diese Bedenken aufwiegen. Davon abgesehen wurde die Verfügbarkeit solcher Informationen in den Medien bereits breit diskutiert.
5. Ray Kurzweil, *The Age of Intelligent Machines* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1990).
6. Ken Alibek, *Biohazard* (New York: Random House, 1999).
7. Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines* (New York: Viking, 1999).
8. Bill Joy, „Why the Future Doesn’t Need Us“, *Wired*, April 2000, <http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html>.
9. Handbücher zu Gen-Splicing (wie A. J. Harwood, ed., *Basic DNA and RNA Protocols* [Totowa, N.J.: Humana Press, 1996]) sowie Chemikalien und Laborausrüstung für Gen-Splicing sind frei verfügbar. Selbst wenn der Zugang in der westlichen Welt

eingeschränkt würde, wäre dieses Material immer noch über zahlreiche russische Händler beziehbar.

10. Für eine detaillierte Zusammenfassung der „Dark Winter“ Simulation, siehe „DARK WINTER: A Bioterrorism Exercise June 2001“: http://www.biohazardnews.net/scen_smallpox.shtml. Eine knappe Zusammenfassung findet sich hier: <http://www.homelandsecurity.org/darkwinter/index.cfm>.
11. Richard Preston, „The Specter of a New and Deadlier Smallpox“, *New York Times*, 14. Oktober 2002, verfügbar unter <http://www.ph.ucla.edu/epi/bioter/specterdeadliersmallpox.html>.
12. Alfred W. Crosby, *America's Forgotten Pandemic: The Influenza of 1918* (New York: Cambridge University Press, 2003).
13. „Power from Blood Could Lead to ‚Human Batteries‘“, *Sydney Morning Herald*, 4. August 2003, <http://www.smh.com.au/articles/2003/08/0311059849278131.html>.
Siehe Anmerkung 129 in Kapitel 5. Siehe auch S. C. Barton, J. Gallaway und P. Atanassov, „Enzymatic Biofuel Cells for Implantable and Microscale Devices“, *Chemical Reviews* 104.10 (Oktober 2004): 4867–86.
14. J. M. Hunt hat ausgerechnet, dass es $1,55 \times 10^{19}$ Kilogramm (10^{22} Gramm) organischen Kohlenstoff auf der Erde gibt. Mit diesem Wert und unter der Annahme, dass sämtlicher „organischer Kohlenstoff“ in der Biomasse enthalten ist (Biomasse ist nicht klar definiert, darum wählen wir diesen konservativen Ansatz), können wir die ungefähre Anzahl an Kohlenstoffatomen berechnen:
Mittleres Atomgewicht von Kohlenstoff = 12,011.
Kohlenstoff in der Biomasse = $1,55 \times 10^{22}$ Gramm / 12,011 = $1,3 \times 10^{21}$ Mol.
 $1,3 \times 10^{21} \times 6,02 \times 10^{23}$ (Avogadro-Konstante) = $7,8 \times 10^{44}$ Kohlenstoffatome
J. M. Hunt, *Petroleum Geochemistry and Geology* (San Francisco: W. H. Freeman, 1979).

15. Robert A. Freitas Jr., „The Gray Goo Problem“, 20. März 2001, <http://www.KurzweilAI.net/articles/art0142.html>.
16. „Gray Goo Is a Small Issue“, Briefing Document, Center for Responsible Nanotechnology, 14. Dezember 2003, <http://crnano.org/BD-Goo.htm>; Chris Phoenix und Mike Treder, „Safe Utilization of Advanced Nanotechnology“, Center for Responsible Nanotechnology, Januar 2003, <http://crnano.org/safe.htm>; K.Eric Drexler, *Engines of Creation*, Kapitel 11, „Engines of Destruction“ (New York: Anchor Books, 1986), S. 171–90, http://www.foresight.org/EOC/EOC_Chaptec11.html; Robert A. Freitas Jr. und Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines*, Abschnitt 5.11, „Replicators and Public Safety“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004), S. 196–99, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/5.11.htm>. und Abschnitt 6.3.1, „Molecular Assemblers Are Too Dangerous“, S. 204–6, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/6.3.1.htm>; Foresight Institute, „Molecular Nanotechnology Guidelines: Draft Version 3.7“, 4. Juni 2000, <http://www.foresight.org/guidelines/>.
17. Robert A. Freitas Jr., „Gray Goo Problem“ und „Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations“, Zyvex Neuauflage, April 2000, Abschnitt 8.4 „Malicious Ecophagy“ und Abschnitt 6.0 „Ecophagic Thermal Pollution Limits (ETPL)“, <http://www.foresight.org/NanoRev/Ecophagy.html>.
18. Nick D. Bostrom, „Existential Risks: Analyzing Human Extinction Scenarios and Related Hazards“, 29. Mai 2001, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0194.html>.
19. Robert Kennedy, *13 Days* (London: Macmillan, 1968), S. 110.
20. In H. Putnam, „The Place of Facts in a World of Values“, in D. Huff und O. Prewitt, eds., *The Nature of the Physical Universe* (New

York: John Wiley, 1979), S. 114.

21. Graham Allison, *Nuclear Terrorism* (New York: Times Books, 2004).
22. Martin I. Meltzer, „Multiple Contact Dates and SARS Incubation Periods“, *Emerging Infectious Diseases* 10.2 (Februar 2004), <http://www.cdc.gov/ncidod/EID/vol10no2/03-0426-G1.htm>.
23. Robert A. Freitas Jr., „Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes Using Digest and Discharge Protocol“, Zyvex Neuauflage, März 2001, <http://www.rfreitas.com/Nano/Microbivores.htm> und „Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes“, *Foresight Update* no. 44, März 31, 2001, S. 11–13, <http://www.imm.org/Reports/Rep025.html>.
24. Max More, „The Proactionary Principle“, Mai 2004, <http://www.maxmore.com/proactionary.htm> und <http://www.extropy.org/proactionaryprinciple.htm>. More fasst sein „proaktionäres Prinzip“ folgendermaßen zusammen:
 1. Die Freiheit der Menschen, technische Innovation zu betreiben, ist wertvoll für die Menschheit. Die Beweislast liegt somit bei denen, die restriktive Maßnahmen fordern. Alle vorgeschlagenen Maßnahmen sollten eingehend geprüft werden.
 2. Bewerte Risiken nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft, nicht nach der öffentlichen Wahrnehmung, und berücksichtige Verfälschungen durch Befangenheit.
 3. Bevorzuge die Bekämpfung bekannter und erwiesener Bedrohungen für die menschliche Gesundheit und die Qualität der Umwelt gegenüber Maßnahmen gegen hypothetische Risiken.
 4. Behandle technische Bedrohungen gleich wie natürliche Risiken; vermeide natürliche Risiken zu unterschätzen und Risiken

menschlicher Technik überzubewerten. Trage den Vorteilen technischen Fortschritts vollständig Rechnung.

5. Berücksichtige, was für Gelegenheiten beim Verzicht auf eine Technik verpasst werden, und was für Kosten und Risiken dadurch entstehen; wäge sorgfältig die breitflächigen Auswirkungen und Folgewirkungen ab.
 6. Ergreife nur dann restriktive Maßnahmen, wenn die potenziellen Auswirkungen einer Aktivität sowohl wahrscheinlich als auch schwerwiegend sind. In diesen Fällen und falls die Aktivität auch Vorteile hat, ignoriere die Auswirkung, insofern eine Anpassung an die nachteiligen Effekte möglich ist. Wenn Maßnahmen zur Beschränkung des technischen Fortschritts gerechtfertigt erscheinen, stelle sicher, dass der Umfang dieser Maßnahmen dem Umfang der wahrscheinlichen Auswirkungen angemessen ist.
 7. Wähle die Prioritäten von Entscheidungskriterien bei der Auswahl von Maßnahmen zur Einschränkung des technischen Fortschritts folgendermaßen: Bewerte Risiken für Menschen und anderes intelligentes Leben höher als Risiken für andere Spezies; bewerte nicht tödliche Bedrohungen für die Gesundheit von Menschen höher als reine Umweltbedrohungen (in überschaubarem Rahmen); bewerte unmittelbare Bedrohungen höher als weiter entfernte Bedrohungen; bevorzuge Schätzungen mit dem höchsten Erwartungswert und bewerte sichere Bedrohungen höher als weniger sichere Bedrohungen; und irreversible und langfristige Auswirkungen höher als flüchtige Auswirkungen.
25. Martin Rees, *Our Final Hour: A Scientist's Warning: How Terror, Error, and Environmental Disaster Threaten Humankind's Future in This Century-on Earth and Beyond* (New York: Basic Books, 2003).
26. Scott Shane, *Dismantling Utopia: How Information Ended the Soviet Union* (Chicago: Ivan R. Dee, 1994); siehe auch James A.

Dorn, <http://www.cato.org/pubs/journal/cj16n2-7.html>.

27. Siehe George DeWan, „Diary of a Colonial Housewife“, *Newsday*, 2005, für einen Einblick in die Schwierigkeiten des menschlichen Lebens vor einigen Jahrhunderten: <http://www.newsday.com/community/guide/lihistory/ny-history-hs331a,0,6101197.story>.
28. Jim Oeppen und James W. Vaupel, „Broken Limits to Life Expectancy“, *Science* 296.5570 (10. Mai 2002): 1029–31.
29. Steve Bowman und Helit Barel, *Weapons of Mass Destruction: The Terrorist Threat*, Congressional Research Service Report for Congress, 8. Dezember 1999, <http://www.cnire.org/nle/crsreports/international/inter-75.pdf>.
30. Eliezer S. Yudkowsky, „Creating Friendly AI 1.0, The Analysis and Design of Benevolent Goal Architectures“ (2001), The Singularity Institute, <http://www.singinst.org/CFAI/>; Eliezer S. Yudkowsky, „What Is Friendly AI?“ 3. Mai 2001, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0172.html>.
31. Ted Kaczynski, „The Unabomber’s Manifesto“, 14. Mai 2001, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0182.html>.
32. Bill McKibben, *Enough: Staying Human in an Engineered Age* (New York: Times Books, 2003).
33. Kaczynski, „The Unabomber’s Manifesto.“
34. Foresight Institute und IMM, „Foresight Guidelines on Molecular Nanotechnology“, 21. Februar 1999, <http://www.foresight.org/guidelines/current.html>; Christine Peterson, „Molecular Manufacturing: Societal Implications of Advanced Nanotechnology“, 9. April 2003, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0557.html>; Chris Phoenix und Mike Treder, „Safe

Utilization of Advanced Nanotechnology“, 28. Januar 2003, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0547.html>; Robert A. Freitas Jr., „The Gray Goo Problem“, KurzweilAI.net, 20. März 2002, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0142.html>.

35. Robert A. Freitas Jr., privater Austausch mit Ray Kurzweil, Januar 2005. Genaue Beschreibung in Robert A. Freitas Jr., „Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations.“
36. Ralph C. Merkle, „Self Replicating Systems and Low Cost Manufacturing“, 1994, <http://www.zyvex.com/nanotech/selfRepNATO.html>.
37. Neil King Jr. und Ted Bridis, „FBI System Covertly Searches E-mail“, *Wall Street Journal Online* (10. Juli 2000), <http://zdnet.com.com/210011-522071.html?legacy=zdn>.
38. Patrick Moore, „The Battle for Biotech Progress-GM Crops Are Good for the Environment and Human Welfare“, *Greenspirit* (Februar 2004), <http://www.greenspirit.com/logbook.cfm?msid=62>.
39. „GMOs: Are There Any Risks?“ European Commission (9. Oktober 2001), http://europa.eu.int/comm/research/biosociety/pdf/gmo_press_release.pdf.
40. Rory Carroll, „Zambians Starve As Food Aid Lies Rejected“, *Guardian* (17. Oktober 2002), <http://www.guardian.co.uk/gmdebate/Story/0,2763,813220,00.html>.
41. Larry Thompson, „Human Gene Therapy: Harsh Lessons, High Hopes“, *FDA Consumer Magazine* (September–Oktober 2000), http://www.fda.gov/fdac/features/2000/500_gene.html.
42. Bill Joy, „Why the Future Doesn’t Need Us.“

43. Die Foresight Guidelines (Foresight Institute, Version 4.0, Oktober 2004, <http://www.foresight.org/guidelines/current.html>) sind auf den Umgang mit den positiven und negativen Konsequenzen der Nanotechnik ausgerichtet. Sie sind dazu gedacht, Bürger, Unternehmen und Regierungen zu informieren und konkrete Richtlinien für die verantwortungsvolle Entwicklung nanotechnischer molekularer Fertigung bereitzustellen. Die Foresight Guidelines waren ursprünglich das Ergebnis des von dem Institut durchgeführten Workshop on Molecular Nanotechnology Research Policy Guidelines, 19.–21. Februar 1999. Zu den Teilnehmern zählten James Bennett, Greg Burch, K. Eric Drexler, Neil Jacobstein, Tanya Jones, Ralph Merkle, Mark Miller, Ed Niehaus, Pat Parker, Christine Peterson, Glenn Reynolds und Philippe Van Nederveelde. Seither wurden die Richtlinien mehrfach aktualisiert.
44. Martine Rothblatt (CEO von United Therapeutics) hat vorgeschlagen, dieses Moratorium durch einen Regulationsapparat zu ersetzen. Eine neu einzurichtende internationale Aufsichtsbehörde für Xenotransplantation solle Herden genveränderter Schweine, die frei von Krankheitserregern sind, inspizieren und für Xenoimplantate freigeben. Rothblatts Lösung würde auch ermöglichen, bösartige Xenotransplantations-Chirurgen auszubooten: Jedem Land, das der DCA beitrifft und ihre Regeln innerhalb seiner Grenzen durchsetzt, würde Zugang zu erregerefreien Xenotransplantaten für Bürger mit Organversagen in Aussicht gestellt. Siehe Martine Rothblatt, „Your Life or Mine: Using Geoethics to Resolve the Conflict Between Public and Private Interests“, in *Xenotransplantation* (Burlington, Vt.: Ashgate, 2004). Anmerkung: Ich bin Vorstandsmitglied von United Therapeutics.
45. Siehe Singularity Institute, <http://www.singinst.org>. Siehe auch Anmerkung 30. Yudkowsky richtete das Singularity Institute for Artificial Intelligence (SIAI) ein, um „gutartige KI“ zu entwickeln, mit dem Ziel, „kognitive Inhalte, Aufbauaspekte und kognitive

Architekturen zu schaffen, die zu Gutartigkeit führen“, bevor nahezu menschliche oder übermenschliche KIs möglich werden. Das SIAI hat die SIAI Guidelines on Friendly AI entwickelt: „Friendly AI“, <http://www.singinst.org/friendly/>. Ben Goertzel und sein Artificial General Intelligence Research Institute haben sich ebenfalls mit Aspekten der Entwicklung gutartiger KI befasst. Goertzels Fokus liegt auf der Entwicklung der Novamente AI Engine, einer Sammlung von Lernalgorithmen und Architekturen. Peter Voss, Gründer von Adaptive A.I. Inc., befasst sich ebenfalls mit gutartiger KI: <http://adaptiveai.com/>.

46. Integrated Fuel Cell Technologies, <http://ifctech.com>. Anmerkung: Der Autor ist Investor und Berater von IFCT.
47. *New York Times*, 23. September 2003, Leitartikel.
48. Das House Committee on Science des U.S.-Repräsentantenhauses hatte am 9. April 2003 eine Anhörung zur Untersuchung „der gesellschaftlichen Implikationen von Nanotechnik und H.R. 766, dem Nanotechnology Research and Development Act of 2002“. Siehe „Full Science Committee Hearing on the Societal Implications of Nanotechnology“, <http://www.house.gov/science/hearings/full03/index.htm>, and „Hearing Transcript“, http://commdocs.house.gov/committees/science/hsy86340.000/hsy86340_0f.htm. Ray Kurzweils Aussage: <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0556.html>. Siehe auch Amara D. Angelica, „Congressional Hearing Addresses Public Concerns About Nanotech“, 14. April 2003, <http://www.KurzweilAI.net/articles/art0558.html>.

Kapitel 9: Antworten auf Kritik

1. Michael Denton, „Organism and Machine“, in Jay W. Richards et al., *Are We Spiritual Machines? Ray Kurzweil vs. the Critics of Strong A.I.* (Seattle: Discovery Institute Press, 2002), <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0502.html>.
2. Jaron Lanier, „One Half of a Manifesto“, *Edge* (25. September 2000), <http://www.edge.org/documents/archive/edge74.html>.
3. Ebd.
4. Siehe **Kapitel 5** und 6 für Beispiele von tief in unserer Infrastruktur verwurzelter schwacher KI.
5. Lanier, „One Half of a Manifesto.“
6. Ein Beispiel ist Kurzweil Voice, ursprünglich entwickelt von Kurzweil Applied Intelligence.
7. Alan G. Ganek, „The Dawning of the Autonomic Computing Era“, *IBM Systems Journal* (März 2003), http://www.findarticles.com/p/articles/mi_m0ISJ/is_1_42/ai_98695283/print.
8. Arthur H. Watson und Thomas J. McCabe, „Structured Testing: A Testing Methodology Using the Cyclomatic Complexity Metric“, NIST special publication 500–35, Computer Systems Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 1996.
9. Mark A. Richards und Gary A. Shaw, „Chips, Architectures and Algorithms: Reflections on the Exponential Growth of Digital Signal Processing Capability“, eingereicht bei der *IEEE Signal Processing*, Dezember 2004.
10. Jon Bentley, „Programming Pearls“, *Communications of the ACM* 27.11 (November 1984): 1087–92.
11. C. Eldering, M. L. Sylla, und J. A. Eisenach, „Is There a Moore’s Law for Bandwidth“, *IEEE Communications* (Oktober 1999): 117–21.

12. J. W. Cooley und J. W. Tukey, „An Algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series“, *Mathematics of Computation* 19 (April 1965): 297–301.
13. Es gibt geschätzt 100 Milliarden Neuronen mit jeweils geschätzt 1.000 Ausgängen, also insgesamt etwa 100 Billionen (10^{14}) Verknüpfungen. Jede Verknüpfung benötigt mindestens 70 Bits für die ID der beiden verbundenen Neuronen. Das ergibt geschätzt 10^{16} Bits. Selbst das unkomprimierte Genom umfasst nur 6 Milliarden Bits (etwa 10^{10}) – ein Verhältnis von $10^6 : 1$. Siehe **Kapitel 4**.
14. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, Bd. I, *Basic Capabilities*, Abschnitt 6.3.4.2, „Biological Chemomechanical Power Conversion“ (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), S. 147–48, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.2.htm#p4>; siehe illustration auf <http://www.nanomedicine.com/NMI/Figures/6.2.jpg>.
15. Richard Dawkins, „Why Don't Animals Have Wheels?“ *Sunday Times*, 24. November 1996, <http://www.simonyi.ox.ac.uk/dawkins/WorldOfDawkins-archive/Dawkins/Work/Articles/1996-1124wheels.shtml>.
16. Thomas Ray, „Kurzweil's Turing Fallacy“, in Richards et al., *Are We Spiritual Machines?*
17. Ebd.
18. Anthony J. Bell, „Levels and Loops: The Future of Artificial Intelligence and Neuroscience“, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 354 (1999): 2013–20, <http://www.cnl.salk.edu/~tony/ptrsl.pdf>.
19. Ebd.
20. David Dewey, „Introduction to the Mandelbrot Set“, <http://www.ddewey.net/mandelbrot>.
21. Christof Koch zitiert in John Horgan, *The End of Science* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1996).

22. Roger Penrose, *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness* (New York: Oxford University Press, 1996); Stuart Hameroff und Roger Penrose, „Orchestrated Objective Reduction of Quantum Coherence in Brain Microtubules: The ‚Orch OR‘ Model for Consciousness“, *Mathematics and Computer Simulation* 40 (1996): 453–80, <http://www.quanturnconsciousness.org/penrosehameroff/orchOR.html>.
23. Sander Olson, „Interview with Seth Lloyd“, 17. November 2002, http://www.nano magazine.com/i.php?id=2002_11_17.
24. Bell, „Levels and Loops.“
25. Siehe die Diagramme zum exponentiellen Wachstum von Berechnung in Kapitel 2 (Seite 66 und 69).
26. Alfred N. Whitehead und Bertrand Russell, *Principia Mathematica*, 3 Bd. (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1910, 1912, 1913).
27. Gödels Unvollständigkeitstheorem erschien erstmals in seinem Artikel „Überformal unentscheidbare Sätze der *Principia Mathematica* und verwandter Systeme I“, *Monatshefte für Mathematik und Physik* 38 (1931): 173–98.
28. Alan M. Turing, „On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem“, *Proceedings of the London Mathematical Society* 42 (1936): 230-65. Das „Entscheidungsproblem“ besteht darin, vorab zu entscheiden, ob ein Algorithmus zu einem Ende (einer Entscheidung) kommen wird, oder sich in einer Endlosschleife verfängt.
29. Churchs Version erschien in Alonzo Church, „An Unsolvble Problem of Elementary Number Theory“, *American Journal of Mathematics* 58 (1936): 345–63.
30. Eine unterhaltsame Einführung in einige Implikationen der Church-Turing-These: Douglas R. Hofstadter, *Gödel; Escher, Bach: An*

Eternal Golden Braid (New York: Basic Books, 1979).

31. Das Fleißiger-Bieber-Problem ist ein Vertreter einer großen Klasse nicht berechenbarer Funktionen, siehe Tibor Rado, „On Noncomputable Functions“, *Bell System Technical Journal* 41.3 (1962): 877–84.
32. Ray, „Kurzweil’s Turing Fallacy.“
33. Lanier, „One Half of a Manifesto.“
34. Ein ausreichend entwickelter Mensch, der nicht schläft und sich nicht in einem Koma befindet, gilt als bewusst.
35. John R. Searle, „I Married a Computer“, in Richards et al., *Are We Spiritual Machines?*
36. John R. Searle, *The Rediscovery of the Mind* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1992).
37. Hans Moravec, Letter to the Editor, *New York Review of Books*, http://www.kurzweiltech.com/Searle/searle_response_letter.htm.
38. John Searle an Ray Kurzweil, 15. Dezember 1998.
39. Lanier, „One Half of a Manifesto.“
40. David Brooks, „Good News About Poverty“, *New York Times*, 27. November 2004, A35.
41. Hans Moravec, Letter to the Editor, *New York Review of Books*, http://www.kurzweiltech.com/Searle/searle_response_letter.htm.
42. Patrick Moore, „The Battle for Biotech Progress—GM Crops Are Good for the Environment and Human Welfare“, *Greenspirit* (Februar 2004), <http://www.greenspirit.com/logbook.cfm?msid=62>.
43. Joel Cutcher-Gershenfeld, private Kommunikation mit Ray Kurzweil, Februar 2005.
44. William A. Dembski, „Kurzweil’s Impoverished Spirituality“, in Richards et al., *Are We Spiritual Machines?*

45. Denton, „Organism and Machine.“

Epilog

1. So zitiert in James Gardner, „Selfish Biocosm“, *Complexity* 5.3 (Januar– Februar 2000): 34–45.
2. Für $x = 0$ ist die Funktion $y = 1/x$ buchstäblich undefiniert. Wir können jedoch zeigen, dass der Wert von y jede endliche Zahl übersteigt. Wir können $y = 1/x$ in $x = 1/y$ umwandeln, indem wir Zähler und Nenner auf beiden Seiten der Gleichung vertauschen. Wenn wir also für y eine beliebig große Zahl einsetzen, so sehen wir, dass x sehr klein wird, jedoch nie ganz Null – egal wie groß y ist. Darum kann man annehmen, dass der Wert von y in $y = 1/x$ jeden endlichen Wert übersteigt, wenn $x = 0$. Anders ausgedrückt können wir für jeden endlichen Wert von y einen größeren Wert erzeugen, indem wir für x einen Wert wählen, der größer als 0 aber kleiner als 1 geteilt durch jenen y -Wert ist.
3. Unter Annahme von 10^{16} cps für die funktionale Simulation des menschlichen Gehirns (siehe **Kapitel 3**) und mit etwa 10^{10} (unter zehn Milliarden) menschlichen Gehirnen kommen wir auf 10^{26} cps für alle biologischen menschliche Gehirne. Wenn wir von der etwas konservativeren Schätzung von 10^{19} cps ausgehen, die sich aus den Anforderungen für die Simulation sämtlicher Nichtlinearitäten aller neuronaler Komponenten (Dendriten, Axone und so weiter) ergibt, so kommen wir auf einen Faktor von 10^{61} . Eine Billion Billionen Billionen Billionen sind 10^{60} .
4. Siehe Schätzungen in der letzten Anmerkung; 10^{42} übersteigt diesen Faktor um zehntausend Billionen (10^{16}).
5. Stephen Jay Gould, „Jove’s Thunderbolts“, *Natural History* 103.10 (Oktober 1994): 6–12; Kapitel 13 in *Dinosaur in a Haystack: Reflections in Natural History* (New York: Harmony Books, 1995).

Index

Symbole

18. Jahrhundert 52

19. Jahrhundert 52, 91, 161, 163, 492

20. Jahrhundert 12, 41, 66–67, 154, 163, 241, 373, 409, 468, 510, 531, 582

21. Jahrhundert 7, 12, 24, 49, 79, 111, 143, 200, 205, 321, 330–31, 424, 426, 485, 531

22. Jahrhundert 351, 358, 374

1930er 100, 468, 517

1960er 2, 24, 52, 63, 156, 380, 403, 413, 595, 621

1970er 3, 113, 216, 265, 267, 380

1980er 3, 14, 52, 76, 83, 216, 228, 264, 267, 277, 282, 380, 405, 410, 517, 520, 534, 594

1990er 3, 76, 100, 101, 215, 277, 408, 419, 516, 520, 552

2000er 3, 100, 103, 264

2010er 343, 345

2020er 26, 102, 163, 167, 198, 200, 202, 227, 233, 242, 245, 296–97, 308, 322, 339, 345, 348, 387, 415, 438, 440, 489

2030er 134, 200–02, 300, 311, 313–14, 322, 329, 341, 348, 440, 494

2040er 24, 134, 202, 258, 264, 300, 313–14, 321–22, 341, 388, 557

2045 (Datum der Singularität) 134, 135

A

Abbott, Larry 170, 564

ABC-Waffen 421

Adrian, E. D. 154, 561

Afrika 93, 419, 428

AIDS 93, 487

AIG (Algorithmischer Informationsgehalt) 37–38

Aktivierungsmuster 152–53, 173, 313, 480, 484

Allan, Alasdair 284

Allen, Paul 350

Allzweckcomputer 116, 118, 137, 278

Alterung 212–13, 215, 217–19, 328, 387, 409

American Chemical Society 112, 547, 586–87, 590, 592, 611

American Council for the United Nations University 247, 589

American Museum of Natural

History 19, 520

American Psychological Association 169

Ames Research Center 114

Aminosäureketten 28, 148, 209, 234, 314, 425, 501

Aminosäuren 46, 82, 207–10, 214, 537

Anderson, W. French 197, 571

A New Kind of Science (Wolfram) 82, 537–38

Anissimov, Michael 10, 303, 326–27
Anthropisches Prinzip 365–67, 372
Arbib, Michael 190
Argonne National Laboratory 121, 286
Aristoteles 154, 344
ARPANET 76
Artenvielfalt 33, 265
Asien 282, 428, 486, 489
Asteroiden 40, 284, 410, 418
Asymptote 43, 45, 90, 231, 441, 597
Atombombe 283, 404, 416–17, 421, 621
auditorische System 122, 148, 183, 185, 196, 467
Außerirdische 366
Autoimmunerkrankung 224, 440
Automaten 17, 82–85, 87–89, 91, 236, 367, 464, 492, 538–42
Automatisierung 104, 288, 452, 526
Aviram, Avi 113, 548
Axon 123, 146, 151, 155, 157, 176, 442, 564, 631

B

Babagge, Charles 91
Babcock, Alpheus 52
Baby-Boomer 140, 210, 212, 226, 381
Backpropagation 156–57
Baker, Andrew H. 216

Barlow, Horace 154

Barol Jr., Thomas M. 190

Barrow, John 364, 518

Barrow Neurological Institute in Phoenix 192

Bauchspeicheldrüse 123, 168, 243, 311–12

Bayes'sche Netze 268–69, 282

Bayes, Thomas 268, 595

Bell, Anthony J. 169, 460, 466, 563, 629

Bell, Gordon 334

Bell Labs 157, 561

Bentley, Jon 453, 628

Berechnungseffizienz 136

Bergeron, Bryan 334

Berger, Ted 188, 196

Berg, Paul 431

Berra, Yogi 15

Beveridge, W. I. 441

Bewusstsein 83, 191, 194, 202, 331, 344, 369, 379, 385–86, 388–92, 395–96, 398–401, 406, 443, 465–66, 474–75, 478–79, 481–85, 487, 493, 495, 507

Bezos, Jeff 94

Biegung der Kurve, die 11, 95, 154, 264

bildgebende Verfahren 144, 148, 158–59, 162, 198, 612

Bildung 104, 282, 342–43, 346, 408, 427

Bils, Mark 98, 545

Biochemie 211, 226, 307, 381, 566

Biologie 16, 46, 81–82, 91, 148, 168, 188, 205–06, 225–26, 228, 232, 234, 240, 271, 326, 328, 366, 372, 384, 399, 424, 465, 496, 520, 542, 573

biologischer Assembler 232–34, 238

biologisches Erbe 33

biologisches Wachstum 43

Biotechnik xi, xii, 28–29, 100, 212–13, 215, 252, 257, 305, 328, 383, 388, 403, 407–08, 419–20, 425, 430–32, 488

biotechnische Revolution 81, 140, 210, 212, 227–28, 252, 258, 488

Bird, Jon 272

Block, Steven 158

Blue Gene/L 124, 500, 553–54

Blue Gene/P 70

Blut-Hirn-Schranke (BHS) 163–165

Blutkreislauf 163, 165, 214, 254, 307–08, 310, 446, 458

Boese, Christine 344, 616

bösartige starke KI 422, 433, 438

Boston College 235

Boston University 221

Bostrom, Nick 260, 379, 413, 415–17, 623

bottom-up (Ansatz) 115, 182, 498

Bouissou, Brigitte 342, 615

Bradbury, Robert xii, 358

Brain Networks Laboratory 162, 562

Bremermann, Hans 131

Brennstoffzellen 106, 131, 245, 247–49, 310, 340, 347, 434, 473–74, 590

Brickell, Edie 393

Brill, Eric 290

Broadcast-Architektur 412, 422, 425, 433

Broca, Paul 173

Broderick, Damien xiii, 25, 522, 594

Brooks, Rodney 264, 266, 304, 339

Brun, Todd 139, 558

Buchanan, Bruce 289

Buchdruck 42–43, 50, 53

Burke, Peter 112–13

Butler, Samuel 94, 205, 572

C

California Institute of Technology (Caltech) 125, 168, 195–96, 240, 362, 371

Carlisle, Brian 288

Carnegie Mellon University 122, 162, 278, 289, 552

Carroll, Lewis 331

Caspari, Rachel 219

Chaos 26, 40–41, 45, 71, 86, 173, 199, 273, 414, 456, 499, 528, 540, 560

Chaostheorie 152, 498

Chatbot 273, 298

Chaudhuri, Swades K. 249

Chemie 15, 113–14, 168, 228–29, 235, 240–41, 343, 424, 548, 584

Chinesisches Zimmer 444, 474–75, 477–83

Chomsky, Noam 191, 571

Chromosomen 42, 208, 218, 232, 529, 579

Church, Alonzo 469, 629

Churchill, Winston 35, 326, 329

Churchland, Patricia 491

Church-Turing-These 443, 468–70, 629

Ciccolo, Nate 404

Clarke, Arthur C. 50, 441

Clark'sche Gesetz 4

Cold Spring Harbor Laboratory 171, 566

Colicos, Michael A. 176

Computerindustrie 26, 70, 260, 427, 510

Computerrechenleistung 17

Computerschach 276, 278

Computertechnik 7, 36, 54, 66, 129, 199, 372

Computerviren 242, 256–57, 339, 426–27, 429, 431, 437

Cornell University 137, 163

Craig, Arthur 192

Creutzfeldt-Jakob-Krankheit 115

Crick, Francis 206–07

Cristofori, Bartolommeo 52

Cutcher-Gershenfeld, Joel 489, 630

Cyberkrieg 339, 341

Cybernetics 83, 570, 620

Cyborg 195, 313, 387

D

Damasio, Antonio 194

Dana Farber Cancer Center in
Boston 218

Darwin, Charles 205, 447

Datenkompressionsmethoden 36

Datenverarbeitungsverfahren 35

Datenverkehr 77–78, 166, 438, 535, 571

Dawkins, Richard 455, 628

Dayan, Peter 170, 564

Deep Blue 277–79, 293, 457, 475

Deep Fritz 276–80, 457

Deep Space One (Raumsonde) 283

Deep Thought 278

Defense Advanced Research

Projects Agency 195, 334

Deflation 64, 99–100, 106

de Grey, Aubrey 212–13, 219–20, 326, 574, 578, 613

Dembski, William A. 445, 491–96, 501, 630

Dendriten 123, 146, 148, 151, 156, 163, 170–71, 180, 192, 194, 198, 203,
394, 442, 464, 466, 468, 553, 631

Denk- und Rechenfähigkeiten 22

Dennett, Daniel 191, 484, 491

Denning, Peter J. 167

Denton, Michael 445, 497–501, 627, 630

Designer-Babys 215, 226

de Transend, David Victor 199

Dezentralisierung 120, 346, 358, 434

Diamantoid-Assembler 235

DiCarlo, James 195

Dijkstra, E. W. 56

diskrete Quanten 15

DNS-Assembler 236

DNS-Molekül 38, 115–16, 207

DNS-Mutationen 219

DNS-Sequenz 72, 216, 218, 223

DNS-Sequenzierung 71, 207, 487

DNS-Strang 114, 116, 207, 216, 236, 399, 550

Doctorow, Cory 273

Dolly das Schaf 222

Dombeck, Daniel 163

Donovan 304

Dornfortsätze 151, 169, 171, 172, 174, 180, 198, 203, 564

Dotcom-Blase 14, 264

Drake, Frank 351, 616

Drake-Gleichung 349, 351–55, 616

Drehimpuls 37

dreidimensionale Molekularchips 45, 109

dreidimensionale Molekularschaltung 28, 66

dreidimensionaler Molekularcomputer 111, 118, 120, 131

Drexler-Assembler 232

Drexler, Eric xiii, 22, 109, 134, 137, 140, 228–32, 235, 237–39, 241–42, 246, 407, 409, 412, 557, 582–89, 591, 593, 623, 626

Dubois, Charles 196

Duke University 115–16, 195, 550

„dumme“ Materie 22

Dyson, Freeman 357, 367

Dyson-Sphäre 357

dystopisch 7

E

Edelman, Gerald 202

Edison, Thomas 52, 343

Effektivität 47, 215–16, 272, 338, 341, 447, 581

Effizienz 39, 41, 47, 100, 117, 125–26, 130, 136, 151, 157, 170, 244, 246, 249–50, 370, 410, 442, 452, 454, 461, 481

Einstein, Albert 39, 132, 203, 347, 362, 389, 541, 572, 618

Eisenhower, Dwight D. 71

elektrochemische Reaktionen 41

Elektrodenröhren 66, 449

Elektronen 15, 56, 82, 117, 118, 129, 137, 140, 167, 239, 362, 517, 539

Ellis, Havelock 387

Emotionen 30, 145, 189, 191–92, 194–95, 204, 304, 320–21, 325, 348, 387, 390, 491, 494, 569

Emulation der Natur 146

Encyclopaedia Britannica 19, 520

Engines of Creation (Drexler) 109, 137, 228, 582–83, 623

Entropie 40, 129, 133, 167, 526, 529, 540

Entscheidungsfindung 192, 267

Epilepsie 216

Ereignishorizont 7, 24, 30, 371, 504–05, 522

Ethik 389, 422

Europa 2, 282, 329, 332, 414, 489, 613

evolutionärer Algorithmus 39, 42, 89–91, 271, 418

Evolution, biologische 5, 18, 22, 28, 39–40, 91–92, 94, 314, 364, 384, 398, 410, 456, 505, 530

Evolution, natürliche 22, 39, 42–43, 90, 92, 128, 135, 272, 456, 465

Evolutionsrate 8

Evolutionsschritt 31, 190

Evolutionsstufe 40–41, 366

Evolution, technische 19, 35–36, 38–40, 42, 45, 380, 526

Evolution von Information 16

Expertensystem 125, 267–69, 282, 285–86, 288, 455, 459, 485

Exponentialkurve 67, 70

Exponentialtrend 9, 56, 66, 447, 503

exponentieller Trend 36

exponentielles Wachstum 8–9, 11, 15, 26, 41–43, 67–68, 71, 74, 100, 103, 110, 154, 197, 264, 274, 279, 296, 365, 374, 387, 420, 472, 510, 513, 523, 525, 533

F

Fantastic Voyage: Live Long

Enough to Live Forever (Kurzweil und Grossman) xi, 210, 217, 328, 508, 573, 574, 620

Faraday, Michael 331

Feigenbaum, Edward 299

Femtotechnik 137, 359

Feringa, Ben 235

Fermi-Paradoxon 351, 355, 364–65

Feynman, Richard 83, 227–28, 326, 555, 582

Finkel, Leif H. 162

Fitch, Tecumseh 191, 571

Fitnessfunktion 39, 370, 372

Fodor, Jerry A. 398

foglets 29, 315, 330, 525

Foresight Institute 229, 407, 424, 432, 582, 585, 587, 623, 625–26

Fortschritt 5, 7–8, 10, 12–13, 17, 22, 25, 28, 36, 40–41, 49, 71, 94, 105, 136, 143, 198, 322, 327, 345–46, 355, 379, 384, 403, 419–24, 427–28, 430, 434, 444–45, 450, 488, 490, 505, 529

Fourier-Transformation 453, 510

Fox, Armando 287

Fraktal 45–46, 462

Franklin, Benjamin 319, 393

Franz von Assisi 393

Fredkin, Edward 82–84, 126, 129–31, 538–39, 554–55

Freiheit 393, 435, 438, 491–92, 624

Freitas, Robert xii, 132, 164–66, 230, 239, 250, 254–56, 309–10, 328, 411–12, 415, 425, 439, 525, 556–57, 559, 563, 571, 582–88, 591–93, 610, 613, 617–18, 623–25, 628

Freud, Sigmund 177, 203, 323, 392

Frisch, Max 347

Friston, K. J. 143, 558, 565

Fuerth, Leon 487, 489

Fundamentalismus 427

funktionale Äquivalenz 123, 135, 136

funktionale Kapazität 136

funktionale Simulation 132, 148, 467, 511, 631

funktionelle Simulation 123

Future-of-Life-Konferenz 12

G

Gabrieli, John 175, 177

Gage, Fred 177

Galaxien 47, 135, 167, 304, 349, 350–51, 353, 355, 359, 362, 364, 369–70, 401, 522, 617

Gardner, James 367, 369, 630

Gardner, Timothy 221

Gedankenexperimente 27

Gehirnaufnahmen 26, 147, 160, 200, 266

Gehirn-Computer-Schnittstelle 195

Gehirnforschung xii, 154, 158–59, 161, 296

Gehirnkapazität 28, 132

Gehirn-Maschinen-Schnittsstelle 195

Gehirnmodellierung 71, 599

Gehirnregionen 26, 28, 118, 121–22, 161, 168, 173, 184, 192, 198, 200, 266–67, 296–97, 312, 442–43, 452, 456, 459–60, 462, 467, 497, 511, 552, 563

Gehirnscans 26, 71, 147, 160, 166–67, 198, 262, 267, 420, 442, 461

Gehirnsimulation 148, 189

Gehirn-Upload 199, 202, 329, 466, 571

Gehirnvolumen 17

geistiges Eigentum 94, 104, 345, 346

Gell-Mann, Murray 37–38, 527

Genetik 71, 81, 205–06, 212, 328, 406, 437

genetischer Code 37, 271, 536

genetischer Algorithmus 90, 153, 271–73, 281, 470, 477, 497–500, 560

genetischer Bauplan 46

genetisch veränderte Organismen (GVOs) 428, 489

Genexpression 17, 214–15, 223, 232–33, 286, 328, 436, 536–37, 574–75, 579

Genom, menschliches 13, 46, 71, 87, 206, 216, 452, 527, 529, 537

Gen-Splicing 431, 622

Gentechnik 214, 305, 403, 405, 414

Gentherapie 215–17, 219–21, 233, 257, 328, 430

Georgia Institute of Technology 453

Gesetz vom steigenden Ertragszuwachs 3, 30, 35–36, 40, 46, 56, 70–71, 93–95, 103–05, 107, 120, 161, 224, 227, 244, 246, 258, 266, 351,

354, 356, 447–48, 473–74, 486, 490–91, 509, 523, 533

Gesundheit xi–xii, 212, 225, 237, 258, 307, 346–47, 381, 428, 489, 508, 624

Gilder, George 380, 406, 516

Giorelli, Giulio 379

Gisin, Nicolas 361

Glasgow University 216

GNR 71, 96, 205, 260, 345, 403, 406, 411, 413, 418–20, 422, 429, 436, 438, 474, 572, 621

GNR-Zeitalter 71

Goda, Yukiko 176

Gödel, Kurt 468

Goertzel, Ben 281, 605, 627

Good, Irving John 23–24 Gorbatschow, Michail 419

Gott 2, 303, 349, 385, 400–01, 493–95

Gould, Stephen Jay 505, 529, 631

Greenpeace 403, 427–28

Greifwerkzeuge 4

Grenzen der Berechnung 5, 126–27, 131, 356

Grenzen der Rechenkapazität 70, 139, 358

Großhirnrinde 28, 67, 157, 166, 180, 190–91, 524

Grossman, Terry xi–xii, 210–12, 217, 328, 508, 573–74, 620

Großmutterhypothese 306

Gulde, Stephan 119, 551

gutartige KI 422, 627

H

Haldane, J. B. S. 349

Hall, J. Storrs 315, 525, 536, 588

Hall, Tammany 490

Hameroff, Stuart 466, 629

Hans Moravec 24

Hao Yan 115, 550

Harry Potter 4, 5

Harvard University 114, 163, 175, 522, 533, 561

Hauser, Marc 191

Hawking, Stephen 314, 370, 505, 521–22

Hawking-Strahlung 370–71, 505, 522

Hebb, Donald 156

Heimcomputer 26, 68, 124, 279, 419, 490, 530

Heisenbergsche Unschärferelation 137

Henry, Thomas 413

Herzinfarkt 211

Herzkrankheiten 211–12, 217, 384, 426

Hippocampus 171, 176–77, 188–89

historisch-exponentielle Perspektive 14

HIV 72, 410, 414, 432, 534

Hobbes, Thomas 344, 616

Hochberg, David 363, 619

Hodgkin, A. L. 155, 561

Hofstadter, Douglas 4, 169, 198, 515–16, 594, 608, 629

Holismus 445, 496

Holografisches Prinzip 373–74

holografisches Universum 373, 504

Hologramm 153, 172, 373

Hominid 40, 528

Homo sapiens 42, 47, 196, 524, 528

Horwitz, B. 143, 558

Hubel, D. H. 174, 564

Hughes, James 408

Humanismus 429

Huxley, A. F. 155, 561

Hybrid-Netz 173

I

IBM Thomas J. Watson Research Center 112

Immunsystem 218, 220, 242, 256, 412, 414, 425–27, 431–32, 439–40

Industrialisierung 29, 93

Informatik 10, 56, 206, 266, 281, 299, 334, 424

Informationsevolution 17, 22

Informationsrevolution 81

Informationstechnik 9, 25–26, 41, 56, 64, 71, 82, 99, 101, 104, 106, 224, 244, 266, 387, 444, 447–49, 473–74, 486–87, 489, 500, 523, 545

Informationsübertragung 22, 30, 74, 117, 360, 530

Informationsverarbeitung 15, 74, 84, 91, 126–27, 159, 169–70, 183–84, 281, 312, 458–59, 473, 497, 521

Ingber, Donald 163

Institute for Advanced Studies in Princeton 139

Intelligenz, außerirdische 349, 351, 359

Intelligenz, biologische 17, 31, 134, 201, 300, 315, 321, 322, 359, 366, 385–88, 420, 438, 442, 513

Intelligenz, emotionale 29, 123, 191, 387, 400

Intelligenz, maschinelle 26–27, 146, 201, 262, 457

Intelligenz, menschliche 8–9, 23, 26–29, 81, 90, 110, 121, 127, 134–35, 145, 190, 198, 200, 203, 261–65, 280, 289, 293–96, 298, 300, 304, 314, 341, 349, 363, 382, 411, 420, 442–45, 447, 450, 454, 455–57, 459, 470, 472, 478, 492, 496, 499–500, 503, 509, 523

Intelligenz, nichtbiologische 4, 27, 29, 127, 134–35, 146, 201–02, 258, 260, 262, 264, 297, 300, 303, 313, 316, 321–22, 341, 343, 346, 358–59, 383, 385, 387–89, 409, 420, 422, 438, 442, 461, 474, 489, 513, 612

International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) 56, 110, 125, 296, 531

Internet 14, 27, 33, 36, 38, 42, 71, 76–77, 93, 95, 114, 124–25, 134, 153, 256–57, 261, 264–65, 280, 282, 317, 339, 342–44, 353, 404–05, 407–08, 419, 426, 434, 444, 473, 486, 513, 517, 526, 530–31, 535, 545, 558, 615, 621

intuitiv-lineare Geschichtsbetrachtung 95

intuitiv-lineare Perspektive 95

in vitro 167, 171

in vivo 162, 167, 171, 197

Ionenkanäle 151, 170

Ishiyama, Kazushi 308

J

„Jane-Smith“-Turing-Test 201

Jefferson Airplane 304, 320

Jelzin, Boris 419

Jenkins, D. E. 349

Johns Hopkins University 410, 615

Joy, Bill 13, 403, 405, 422, 424, 431, 441, 622, 626

Joyce, Gerald F. 236

Jung, Carl 393

K

Kaczynski, Ted 33, 423–24, 625

Kahn, Ron 307

Kambrische Explosion 38, 47, 456

Kanerva, Pentti 172

Kanonische Meilensteine 21

Kant, Immanuel 342

Kapor, Mitch 298, 608

Kardashev, N. S. 351, 616

Kasparov, Gary 8, 277–78, 280, 295

Kass, Leon 487

Keller, Helen 347

Kelly, T. Ross 235

Kempermann, G. 177, 566

Kephart, Thomas 363

Kernfusion 251, 352

KI (Künstliche Intelligenz) xiii, 4, 8–9, 14, 24, 27, 29, 81, 89–90, 109, 121, 144, 146, 183, 203–04, 241, 247, 259–67, 273, 278–79, 281–89, 292–99, 303, 306, 348, 415, 417, 420, 422, 425, 433–34, 436, 438, 440, 442, 449–50, 453–54, 456–57, 470, 472, 474–75, 479, 515, 523, 594, 596, 627–28

Kleinhirn 67, 122, 124, 145, 147, 169, 178–83, 191, 194, 261, 459, 464

Klenow, Pete 98

Klibanov, Alexander 240

Klonen 214, 221–25, 257, 328

Kluft zwischen Arm und Reich 93

Koch, Christof 195, 465, 629

Kodons 17, 537

Kohlenstoffatom 15, 82, 239, 439, 558

Kohlenstoff-Nanoröhren 28, 229–30, 235, 237, 247, 385

Kommunikation xii, 48, 71, 75, 100–01, 110, 146, 176, 196, 237, 244, 246, 249, 283–84, 292, 298, 301, 305, 308, 312, 318, 321, 338–39, 342–43, 346, 348, 351, 353, 355, 357, 361, 370, 375, 387, 408, 411, 419, 442, 448, 458, 487, 571, 611, 630

Kommunikationstechnik 49, 50, 74, 95, 100, 101, 354, 473, 531

Komplexität 16, 21, 36–40, 43, 46–47, 54, 82, 86–89, 91–92, 126, 147, 151, 171, 183, 185, 192, 201, 259–60, 287, 365, 367–68, 382, 387, 400, 425, 442–43, 450, 452, 455, 458–59, 461–62, 464, 468, 472, 478, 482–83, 485, 492–94, 497, 499–500, 519, 528, 542

Komplexitätstheorie 86, 145, 273, 498

Komplexitätszunahme 16, 38, 366–67, 410, 526, 543

Kopernikus 349, 447

Körper 1.0 204, 303, 309, 429

Körper 2.0 200, 303, 306, 309, 311, 313–15

Körper 3.0 314–15, 322, 341, 347

Körper, biologischer 9, 204

Kosmos 16, 349, 354–56, 369, 372, 505

Kosten-Nutzen-Maß 70

Kosten-Nutzen-Verhältnis 41

Kramer, Peter D. 169, 563

Kramnik, Vladimir 276

Krebs 211–12, 214, 217–20, 222, 267, 285, 411, 422–23, 425, 436, 530, 606

Krieg 146, 212, 283, 336, 348, 384, 413

Kurzweil Computer Products 95, 545, 559, 595

Kurzweils Chinesisches Zimmer 482

kybernetische Totalisten 391, 450

L

Lamm, Dick 326

Lamoreaux, Steve 138

Landauer, Rolf 129

Langlebigkeit 213, 306, 574

Langzeitgedächtnis 157, 158

Lanier, Jaron 391, 397, 450, 455–56, 472–73, 486, 620, 627–28, 630

Latif, Sajid 342

Laurent, Gilles 168

Lawrence Berkeley National Laboratory 235, 592

Lawrence Livermore National

Laboratory 311, 553, 611

Lebenserwartung 14, 96, 205, 219, 221, 306, 326, 328–29, 335, 344, 408,
421, 614

Lebenskreislauf 7

LeDoux, Joseph 169

Leibniz, G. W. 167, 386

Lenat, Doug 268

Leonardo da Vinci 2, 51, 490

Leonard Susskind 368

Libet, Benjamin 191

Lichtgeschwindigkeit 22, 27, 30, 41, 117, 132, 137–39, 304, 359–65, 372,
374, 521, 530, 540, 571

Lindquist, Susan 115, 176

lineares Wachstum 11

Llinas, Rodolfo 189

Lloyd, Seth 132, 349, 372, 449, 466, 556, 616, 619, 629

Lock-in-Effekt 444, 473

Lohn, Jason 284, 605

Los Alamos National Laboratory 138, 534

Lovley, Derek R. 249

Lowel, S. 176, 565

Lucas, J. R. 260, 387

Ludditen 428, 526

Ludditentum 428

Ludwig-Maximilians-Universität München 236

M

Macer, Darryl 268, 595

Magie 4, 5, 266, 293

Makeig, Scott 173, 564

Malthus 441, 447

Mandelbrot, Benoit 462

Mandelbrot-Menge 462, 464

Markov, Andrei Andreyevich 269

Markov-Modell 87, 151, 153, 269, 281, 477, 499, 560

Martinville, Léon Scott de 52

Maschinen 3, 5,–6, 10, 12, 17, 21, 23–24, 27–33, 41, 50, 92, 94, 99, 113,
121, 129, 134, 140, 146–47, 149, 163, 167, 189, 195, 198, 205–06,
228, 230, 232, 235, 237, 250, 259–63, 268, 278, 284, 286, 293–94,

298–300, 302–04, 307, 310, 313, 315–16, 322, 326, 335, 338, 343, 348, 366, 387, 389–90, 400, 404, 406, 436, 440, 442–43, 446–47, 451, 454, 456–57, 460, 465, 469–71, 475, 477–82, 485–86, 491–97, 499, 501, 507, 523, 526, 582, 594

Maschinenintelligenz 28–30, 300, 341, 366

Massenproduktion 51, 112, 412

Masuoka, Fujio 111

Materialismus 445, 491–92

Mathematik xii, 23, 25, 84, 151, 274, 303–04, 375, 458, 468–69, 503–04, 517, 523, 603, 629

Mauk, Michael D. 182

Max-Planck-Institut für Biologie in Tübingen 188

Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in München 196

Mazur, Eric 163

McCabe, Thomas 452

McCulloch, W. S. 155, 561

McKibben, Bill 403, 407, 423, 621, 625

McLuhan, Marshall 15

Mead, Carver 125, 151, 188–89, 456–57, 554, 560, 567

Medikamente 12, 98, 209, 218, 260, 306, 381, 430, 436, 487, 609

Medina, Javier F. 182

Mencken, H. L. 379

Menschenaffen 39, 47, 192, 528

Mensch-Maschinen-Intelligenz 30

Mensch-Maschinen-Zivilisation 5, 21, 27, 31, 300, 303, 322, 335, 400, 440

Merkle, Ralph xii, 229–30, 240, 412, 425, 587–88, 626

Metcalfe, Bob 513

Mikrotubuli 394, 443, 465–68, 484

Milchstraße 352–54

Militär 260, 282, 284, 337, 340

Millennium 25, 531, 589

Miller, Arthur 386

Miller, Mark 22, 626

Miller, Steve 175

MIMD 118, 229

Miniaturisierung 71, 79, 94, 100, 167, 255, 336, 419, 424

Minicomputer 2

Minsky, Marvin xiii, 156, 178, 190, 203, 228, 260, 292, 491, 561, 607

MIT (Massachusetts Institute of Technology) 63, 111, 115, 132, 156–57, 186, 195, 221, 240, 264–66, 283, 287, 289, 312, 338, 342, 344, 453, 489, 515, 522, 525, 533, 538, 543–44, 556, 561, 563–64, 569–72, 579, 595, 608, 615, 616, 618, 620–22, 630

MIT Media Lab 111, 221, 579

Mitochondrien 163, 220, 608

Mobiltelefon 48, 284, 344, 531

Modis, Theodore 20, 519–21, 526

Molekularcomputer 111, 118, 120, 131

molekulare Fertigung 231, 234, 236, 239, 246, 252, 262, 411

molekularer Assembler 229, 231–32, 240, 242, 262

Moleküle 15, 82, 111, 113, 115, 163, 200, 207, 209, 221, 223, 232–33, 238, 252, 254–55, 366, 394, 425, 447, 462, 498, 501, 518, 529, 585, 591

Montemagno, Carlo 235, 584, 610–11

Moore, Gordon E. 56, 109, 503, 531–32, 546

Moore, Patrick 403, 427, 626, 630

Moore'sche Gesetz 36, 41, 56, 65–66, 70, 74, 79, 110, 113, 449

Moral 1, 385, 389

Moratorium 431–32, 437, 626

Moravec, Hans xiii, 24, 68, 121–22, 148, 188, 205, 288, 293, 480, 522, 533, 552, 570, 608, 630

More, Max xiii, 379, 381, 383, 416, 529, 594, 620, 624

Morris, Michael 362

Morris, Tom 503

Moshfegh, Allen 339, 615

Muggeridge, Malcolm 382

Multiversum 367–68, 370, 375, 518

Musikalität 226, 262

Mussa-Ivaldi, Ferdinando 189

Mustererkennung 26–27, 90, 123, 129, 134, 149, 151, 153, 157, 186, 202, 261, 270, 273–74, 277, 279–81, 284–85, 297, 314, 321–22, 341, 453–54, 456–57, 472, 475, 477, 492, 498, 500, 519, 594, 596, 606

Mutationsrate 42, 89, 220

N

Naam, Ramez 303

Nagaosa, Naoto 117, 551

Nanobots 29, 33, 34, 145, 163–65, 167, 198, 200–02, 233–40, 242, 249–50, 254–58, 262, 296, 303–04, 306–11, 315, 318–24, 359–60, 362, 366, 384, 387, 395, 409, 411–13, 415, 419, 422, 425, 429, 431, 438, 439–40, 446, 489, 585, 590–91

Nanocomputer 134, 233, 356, 425

Nanofabrik 246, 425, 439

Nanomaschinen 165–66, 236, 238, 250, 308, 341

Nanonebel 29, 30, 34

Nanoröhren 28, 111–14, 234–36, 238, 246, 248–49, 252, 254, 314, 338, 341, 411, 547–49

Nanoröhrenchips 111

Nanotechnik xii, 5, 12, 14, 28–29, 55, 59, 71, 80–81, 94, 100, 109–10, 112, 132, 137–38, 140, 163, 200, 205, 221, 227–29, 232–35, 237–38, 241–42, 244, 245, 247–53, 255–58, 260, 262, 264, 303, 305, 318, 329–30, 341, 352, 381, 383, 406–07, 409, 412, 415, 419–22, 424–27, 431–32, 437, 440, 444, 448, 473, 508, 525, 582, 591, 609, 626–27

nanotechnische Revolution 81, 245, 328, 508

NASA 1, 24, 114, 236, 251, 283–84, 339, 522, 591, 605, 615, 617

Nash, Ogden 403

natürliche Auslese 22, 41

Neokortex 171, 306

Nervensystem 29–30, 151, 162–63, 170, 192, 201, 225, 312, 315, 324, 554

Neuroimplantate 29, 196, 202, 322, 384, 611

neuronales Netz 87, 144, 148–49, 151, 153, 155–56, 170–71, 173, 198, 270–73, 281, 286, 291, 442, 457, 462, 477, 499, 560–61, 596, 599–600

Neuronenverbindungen 28, 46, 313, 321–22, 596–99

Neurotransmitterkonzentration 46, 126, 136, 257, 444, 480, 543

Neutronen 15

New Economy 95, 544

Newell, Allen 265

Newton, Isaac 490, 503, 539

New York University 169, 172, 189, 236

Ng, Y. Jack 349

nichtinvasive Methoden 162–63, 196–97

Nicht-Zufälligkeit 38

Nicolelis, Miguel 195

Nietzsche, Friedrich 383–84, 493

Nobel, Alfred 416

NOR-Gatter 92

North Carolina State University 240

Northwestern University 113, 189

Nowatzky, Andreas 162

Nukleinsäuren 46

O

Oak Ridge National Laboratory 237, 251

Och, Franz Josef 291

Ohio State University 286, 350

Ökologie 250

olivozerebellarer Trakt 189

olivozerebellare Trakt 188, 189

Onlinehandel 14, 102

opponierbares Glied (Daumen) 46

Osaka University 238

Oxford University 287, 518, 522, 528, 568, 580, 591, 629

P

Palo Alto Research Center (PARC) 289

Papert, Seymour 156, 178, 516, 561

Paradigmenwechsel 9, 12, 14, 17, 20, 25, 29, 31, 36, 38, 42, 45, 47, 56, 70, 78, 103, 265, 328–29, 340, 444, 446

Parallelisierung 70, 119, 128, 151, 454

Parkinson 144, 196, 216, 256, 307, 312, 395, 573, 611

Parmentola, John A. 337, 614

Pascual-Leone, Alvaro 175

Pasteur, Louis 227

Patternismus 397

Patternist 5, 399

Penrose, Roger 202, 465–66, 629

Perceptrons (Minsky und Papert) 156, 561, 566

Pessimismus 446

Peterson, Christine 230, 407, 588, 625–26

Petricoin III., Emanuel 285

Phoenix, Chris 412, 623, 625

Physik xii–xiii, 15, 83–84, 113, 126–27, 132, 139–40, 158, 168, 229, 319, 324, 326, 362, 366–67, 369, 372, 424, 470, 504–05, 537–39, 541–42, 629

Pikotechnik 137, 140

Piko- und Femtocomputer 138

Pirsig, Robert M. 403

Pitts, W. 155, 561

Planck-Konstante 132, 373

Plancksche Wirkungsquantum 132, 366, 368, 373

Poe, Edgar Allan 316

Poggio, Tomaso xii, 166, 179, 186, 195, 553, 569

Polymerase-Kettenreaktion (PCR) 116

Posthumanität 384, 408

Pouget, Alexandre 179

Prater, Corwyn 326

Preis-Leistungs-Verhältnis 25, 27, 41, 45, 53, 56, 62, 74, 99, 124, 145, 197, 261, 516, 533, 546

Preskill, John 371

Primaten 39, 47, 152, 190, 390, 485, 524, 599

primitive Zellen 47

Princeton University 139, 221, 517, 528, 579, 613

Prionen 115, 176–77, 233, 255, 566

proaktionäres Prinzip 416, 624

probabilistische Fraktale 45–46

probabilistische Regel 268

Proteinfaltung 208–09, 500

Protein-Synthese 47

Protonen 15, 82, 130

Prozessorarchitektur 61

Prukinje, Johannes 181

Punktualismus 43

Purdue University 114, 116

Q

Qbits 466

Quantenberechnung 443, 465–67

Quantencomputer 111, 118–20, 361, 466–67

Quanteneffekte 239, 245, 357, 443, 522

Quantengravitation 15, 368

Quantenmechanik xiii, 117, 361, 363, 391, 445, 465, 504, 517–19, 540–42

Quantenteilchen 47

Qubits 118–20, 618

Quellcode 28, 559

R

Rado, Tibor 470, 630

Ratner, Mark A. 113, 548

Raum-Zeit-Kontinuum 24

Rauschen 20, 38, 152, 158

Ray-Kurzweil-Turing-Test 394, 443

Ray, Thomas 443, 457–59, 462, 472, 628

Rechner-Preis-Leistung 13

recyceln 34, 209, 246, 448

Redwood Neuroscience Institute 160, 172, 460

Rees, Martin 369, 518, 625

Regan, Chris 235

Regel 110 84–86, 88, 92, 542–43

Regulation 171, 216, 287, 384, 407, 423–24, 426, 429–30, 436, 445, 487–88, 524, 562, 567, 574

Reil, Torsten 291, 607

Relativitätstheorie, allgemeine 362, 389

Relativitätstheorie, spezielle 362

Relays 66

Religion 1–2, 380, 382, 385, 393, 400

Rensselaer Polytechnic Institute 111

Respirozyten 29, 255, 310–11, 582

Ressourcen 14, 27, 41, 43, 45, 127, 145, 245, 261, 300, 305–06, 309, 311, 346, 386, 407, 425, 434, 441, 448

Reverse Engineering xii, 4, 26, 47, 81, 113, 122–23, 126, 143–45, 147, 158, 162, 165–66, 169, 183, 185, 194, 196, 198, 213, 231, 255, 262, 266–67, 296–97, 302, 309, 312, 319, 322, 328, 420, 442, 445, 450, 454–55, 459–60, 462, 472, 477, 479, 485, 503, 537, 542, 553, 599–600

reversible Berechnung 129, 134, 245, 357, 442

reversible Rechentechnik 133

Ribosome 17, 147, 199, 207–08, 210, 232–33, 235–36, 239, 425, 501

Richards, Mark A. 453, 628

Rich, Elaine 266–67

Riesenhuber, Maximilian 186, 569

Rilke, Rainer Maria 303

Rizzolatti, Giacomo 190, 570

RNA-Interferenz 12

RNSi (RNS-Interferenz) 214, 257, 328, 430, 436

RNS-Strang 46

Robbin, Herbert 121

Robotik xiii, 24, 71, 81, 205, 259–60, 266, 288, 336, 406, 552

Robot: Mere Machine to Transcend Mind (Moravec) 24

Romantisierung 451

Roscheisen, Martin 250

Rosenblatt, Frank 156, 561

Rosen, Nathan 362

Roska, Botton 187

Rothblatt, Martine xi, xii, 390, 432, 620, 626

Rowland Institute in Harvard 237

Rückkopplungseffekt 40

Rukeyser, Muriel 5

Russell, Bertrand 265, 326, 468, 533, 629

Rutgers University 175, 565

S

Sagan, Carl 19, 35, 353, 362, 520, 616

Sala-i-Martin, Xavier 487

Salk Institute for Biological

Studies 177, 190

Sandberg, Anders 133, 144, 357, 363, 556, 617

San Diego State University 24

San-Hee Lee 219

SARS-Virus 72, 410, 415

Säugetiere 17, 192, 410, 524

Schach 273, 277–80, 293–94, 602–04

Schachcomputer 8, 278–79, 516

Schere zwischen Arm und Reich 445, 486
Schicksal 1, 5, 9, 22, 203, 349, 368–69, 375
Schimpansen 5, 39, 192, 524, 528
Schlüsselereignis 19–20, 36, 43, 520
Schmidt, Bob 285
Schopenhauer, Arthur 7
Schrift 43, 47, 54–55, 297, 303, 344, 482
Schutztechniken 429–431, 433, 436
schwache KI 90, 241, 265, 282, 292, 294, 296, 457
Schwarmintelligenz 339–40
Schwarzes Loch 7, 24, 167, 368–72, 416, 504–05, 521–22
Scripps Research Institute 236, 580, 584
Searle, John 406, 444, 474, 491, 630
sechs Epochen, die 7, 15, 516
Seeman, Nadrian 236, 585
Selbstanordnung 114–15, 120
Selbstorganisation 111, 114, 226, 455, 459, 519, 543
Selbstreplikation 229–30, 232, 238, 411–12, 425, 431, 439
selbstreplizierende RNS 46
SETI xiii, 349, 351, 353–56, 364–66, 370, 616, 618
sexuelle Reproduktion 45, 89, 271, 414, 601
sexuelles Vergnügen 320, 325
Shakespeare 125, 196, 344
Shapiro, Ehud 116

Shaw, Gary A. 453, 628
Shaw, George Bernard 94
Shaw, J. C. 265, 595
Shepherd, Gordon M. 184, 568
Sherman, William 236, 585
Shiping Liao 236, 584
Shostak, Seth xiii, 353, 366, 436, 617
Shoucheng Zhang 117
Signalübertragung 27, 553
Silizium-Intelligenz 385–86
SIMD 116–18, 229
Simon, Herbert 265
Simpson, Michael 237
Singer, Max 431
Singer, W. 176, 565
Singularitarismus 381, 384
Singularitarist 7, 379–81, 516, 620
Singularität xiii, 5, 7–10, 15, 18, 21–25, 30–33, 36, 41, 56, 82, 94, 96, 121, 131, 134–35, 138–40, 145, 205–06, 226, 244, 260, 262, 264, 300, 302–03, 316, 328, 331, 344, 355, 372, 375–76, 380–84, 398–400, 417–18, 444, 449, 503–05, 507–08, 513, 516, 522
Sinnesorgane 17, 306, 311
S-Kurven 43, 50, 66, 70, 78, 101, 245, 473
Smalley, Richard 237–42, 247, 446, 583, 585–86, 588–89
Smart, John 25, 35, 365, 379, 523, 526, 619

Smith, Huston 398

Smolin, Lee 368, 619

Snyder, Allan 161

Snyder, Lawrence H. 179

Software-Assistenten 102

Softwarekomplexität 452

Solarenergie 244, 250, 413, 448

Solartechnik 244, 249, 251, 347

Soma 123, 171

Sommer, Fritz 160

Sonnensystem 34, 284, 356–60, 374, 425, 449, 617

Soros, George 406

Spin 37, 117–18, 129, 133, 360, 373, 466, 551

Spindelneuronen 192, 194–95, 485

Spintronik 111, 117–18

Spiritualität 398–99, 494–95

Sprache 5, 27, 36, 90, 105–06, 146, 173, 190, 281, 289–91, 294, 444, 451, 476, 482

Spracherkennung 5, 153, 184, 266, 269–70, 278, 281, 290–91, 297, 451, 453, 552, 559, 596

Stammzellforschung 488

Stanford University 112, 117, 158, 175, 177, 287, 551

starke KI 14, 81, 90, 260, 262–63, 294–96, 303, 420, 422, 425, 433–34, 436, 438, 440, 449, 470, 474–75

Stein, Gertrude 60

Sterblichkeit 9, 335, 380, 487

St. Louis Universität 248

Stoffwechsel 212, 250, 257, 285, 308–09, 459

Stringtheorie 367–68

Strömer, Horst 254

Strout, Joseph 331

Subjektivität 388, 391, 475

Sun Tsu 103

Supercomputer 26, 68, 70, 126, 150–51, 197, 208, 231, 261, 317, 533, 554, 557

Superintelligenz 260, 262–63, 302

Supernova 24

Supraleitung 117

Svoboda, Karel 171, 564

Symbolverarbeitung 477, 485

Synapsen 21, 123, 145–46, 148, 150–51, 155–57, 162–63, 168–72, 174–76, 179–82, 190, 198, 203, 394, 442, 458, 461, 466, 523, 566

Synapsenaktivität 27, 156, 161

T

Taktfrequenz 61–63, 113, 150

Tallal, Paula 175, 565

Taub, Edward 175

Taylor, J. G. 143, 558

Technologie-Konservatismus 51

technologischer Lebenszyklus 50

TED-Konferenz 319–20, 613

Telomere 218–20, 222, 224, 328, 581

Tesla, Nikola 1, 562

Texas A&M University 162, 562

The 10% Solution for a Healthy Life (Kurzweil) 211, 573

The Age of Intelligent Machines (Kurzweil) 3, 24, 92, 120, 277, 279–80, 282, 294, 405, 515, 522, 538, 543, 608, 622

The Age of Spiritual Machines (Kurzweil) 3–4, 24, 111, 179, 321, 368, 405, 441, 522, 543, 566, 608, 613, 622

Theis, Thomas 112

Thermodynamik 40, 129, 168, 447, 528, 540

Thorne, Kip 362, 371

Tierversuch 161, 217, 221, 254, 579

Tod 211, 213, 256, 326–27, 331–32, 334, 382, 384–85, 393, 413, 421, 448, 487, 595

Toffoli, Tommaso 129, 538, 555

Togerson, Justin 138

Tohoku University in Japan 308

Tomlin, Lily 190

Tom-Swift-Jr. (Buchreihe) 1–2, 4, 515

top-down (Verfahren) 115, 146, 465, 498

Transistoren 28, 41–42, 45, 56, 58, 60–62, 65–66, 70, 74, 110, 112–14, 120, 125–26, 150–51, 153, 157, 188–89, 229–30, 272, 358, 443, 449, 457–58, 467, 516, 532, 536, 539, 546–49

Transzendenz 365, 383, 398–99, 493

Treder, Mike 412, 623, 625

Trinity College (Dublin) 292, 408

Trosch, Rick 312

Tuberkolose 285

Turing, Alan 92, 156, 468, 523

Turingmaschine 92, 443, 468–71, 543

Turing-Test 26, 200–02, 263, 273, 297–300, 394, 443, 458, 478, 481, 490, 523

Turner, Linda 237

Typ-1-Diabetes 224, 256, 581

Typ-2-Diabetes 211, 217, 305

U

Überleben 39, 41, 88, 305, 330, 335, 408, 440

Überlichtgeschwindigkeit 22, 360–62

ultimate Laptop 132–33, 370, 556

Umwelt 39, 40, 135, 173, 206, 228, 242, 250–52, 254, 303, 317, 382, 403, 424, 426, 428, 431, 492, 582, 624

Umweltverschmutzung 29, 421

Universalcomputer 88, 92, 543

universeller Assembler 229

universeller Computer 228

Universität Florenz 292

Universität Genf 361

Universität Innsbruck 119

Universität Tokio 117

Universität von Groningen in den Niederlanden 235

Universität Wien 332

University College in London 292

University of Alabama 175

University of California in Berkeley 112, 131, 187, 406, 474, 548

University of California in Davis 191

University of California in Irvine 112

University of California in Riverside 219

University of California in San Diego 173, 175

University of California in Santa Barbara 137

University of Chicago 98, 524

University of Exeter 284

University of Illinois 113, 256, 341, 548, 582

University of Iowa 194

University of Kentucky 240

University of Massachusetts 249

University of Michigan 219, 308

University of Oklahoma 118, 130, 133

University of Otago in Neuseeland 497

University of Pennsylvania 162, 553, 562

University of Pittsburgh 289

University of Rochester 98, 179

University of Southern California 188, 291, 550

University of Sussex 272

University of Texas 122, 182, 249

University of Tsukuba in Japan 268

University of Utah 313, 612

University of Wales 286

Universum 4–5, 15–16, 22, 24, 30, 47, 82–84, 88, 91, 135, 138, 206, 260,
303–04, 326, 349, 352, 354–55, 359–60, 362–76, 380, 382, 385,
400–02, 418, 447, 449, 504–05, 515, 517–21, 530, 538–41, 617

Unordnung 38, 40, 399, 529, 540

Unsterblichkeit 222, 326, 330–31, 335, 380, 491

uploaden 123, 166, 199–202, 329, 443, 571

Urknall 15, 36, 363, 518

USA 55, 64, 95–96, 103, 282, 285, 294, 306, 329, 336, 346, 414, 426, 489,
534–35, 544, 546, 615–16

U.S. Department of Energy 248, 589

U.S. Naval Academy 240

utopisch 7

V

Vampirbot 249

Vanderbilt University 363

van Praag, Henriette 177

Variation 46, 299, 464, 483, 558

Venter, Craig 216

vermaschte Netze 124, 282

Vinge, Vernor 23–24, 329, 344, 522

virtuelle Körper 29, 200, 204, 319, 324, 330

virtueller Assistent 318

virtuelle Realität 10, 29–30, 34, 165–66, 204, 304, 315, 317–19, 322–25, 336, 341, 346–48, 391, 473, 489–90, 507

virtuelle Umgebung 102, 341, 343, 346, 490

virtuelle Welt 29–30, 319, 324–25, 434

Visser, Matt 363

visuelle System 185–86, 188, 195, 338, 599

Vita-More, Natasha 306, 609, 616

Vlastos, Gregory 50

Vogel, Viola 237

von Neumann, John 10, 24, 228, 230, 413, 517, 582

W

Wachstumsdruck 94, 359

Walczak, Marek 276

Warwick, Kevin 195

Washington University 179, 237, 363

Wasserstoffbombe 403, 413–14, 416–17

Waterston, Robert 206, 572

Watson, Arthur 452

Watson, James 12, 206–07, 572

Wattenberg, Martin 276

Watts, Lloyd 122, 143, 148, 183, 456, 552, 558–59, 568

Wavelet-Transformationen 453

Webb, John 364

Webhosts 76

Weiss, Ron 221, 579

Weizenbaum, Joseph 317

Weizmann Institute of Science 116

Wen-Biao Gan 172

Werblin, Frank S. 187

Wheeler, John 362, 522

Whitehead, Alfred North 71, 189, 423, 468, 533

Whitehead Institute for Biomedical Research 176

Whitesides, George 255, 593

Wiener, Norbert 83, 269, 393, 620

Wiesel, T. N. 174, 564

Wilson, E. O. 196

Winston, Patrick 287

Wirtschaftsvolumen 13

Wirtschaftswachstum 96–97, 100, 103–06, 127, 244, 421, 448, 487, 510, 513

Wise, Kensall 308

Wissensdatenbank 285, 290, 334

Wissensexplosion 417–18

Wissenstransfer 27

Wittgenstein, Ludwig 317

Wolfram, Stephen 82–83, 85, 87–89, 91–92, 464, 499, 537–39, 541–43

Wolfram, Steven 367

World Wide Web 18, 21, 76, 456, 531

Wright, Robert 83, 538

Wurman, Richard Saul 320

Wurmloch 139, 304, 362–64, 371, 374, 454

X

Xerox Palo Alto Research Center 240

Y

Yale University 184

Yeats, William Butler 305

Young, Mike 286

Yudkowsky, Eliezer S. 35, 422, 433–34, 516, 625, 627

Yurtsever, Uri 362

Z

Zelluläre Automaten 82–85, 87–89, 91, 464, 538–42

Zivilisation, außerirdische 356, 364–65

Zivilisation, menschliche 297, 334, 359, 364, 422, 429, 556

Zufallsreihe 37

Zufallssequenz 37, 361

Zukunft 3–4, 7, 10–15, 28–29, 31, 35, 56, 67, 82, 84, 101–02, 105–06, 109, 118, 120, 131, 138–39, 141, 151, 197, 203, 222, 227, 241–43, 248, 258, 269, 303, 315, 317, 320, 329, 337, 345, 350, 360, 369, 372–73, 383–84, 391–92, 419–21, 426, 429, 437, 446, 485–86, 497, 505, 549, 614

Zuse, Konrad 538

- * „Technology“ zerfällt im Deutschen in „Technik“ (technische Vorrichtungen oder Wissen darüber) und „Technologie“ (Lehre von Entwicklung und Geschichte der Technik, z.B. der Inhalt dieses Buches). Die Übersetzung versucht den jeweils sinngerechteren Ausdruck zu wählen, außer bei festen Begriffen (z.B. „Spitzentechnologie“).
- * Das englische „enhanced“ (wörtlich „verbessert“, „erweitert“) wird hier und im Folgenden mit „unterstützt“ oder „erweitert“ übersetzt.
- * Im Original „instantaneous“: unverzüglich, in einem Moment ohne zeitliche Ausdehnung.
- * Im Original: „through indirection“.
- * Wörtlich etwa „umgekehrte technische Planung“; der Rückschluss von einem fertigen Produkt auf dessen Bauplan oder das Funktionsprinzip.
- * Neologismus, wörtl. etwa „Nebelchen“, „Nebelteilchen“.
- * Im Original „law of accelerating returns“, wörtlich etwa „Gesetz des beschleunigenden Ertrags“; die beschleunigende Rückwirkung der Produkte eines Prozesses auf denselben.
- * Im Original „arbitrary“, i.d.R. mit „willkürlich“ übersetzt, was in diesem Zusammenhang jedoch irreführend wäre.
- * Im Original: „power“; d.h. die „Mächtigkeit“ oder „Kraft“ des Prozesses.
- * „Berechnung“ (im Original: „computation“) meint hier i.d.R. das (automatisierte) Manipulieren von Informationen, im Gegensatz zum rein arithmetischen Rechnen („calculation“).
- * Im Original „type“, zu deutsch auch „Drucktype“: spiegelverkehrte Reliefs einzelner Buchstaben, die zu immer neuen Texten angeordnet werden können.
- * „Video Graphics Array“: ein Standard für Computergrafik, der unter anderem die Bildfrequenz festlegt.
- ** „dots per inch“, zu deutsch „Punkte pro Zoll“: Maßeinheit für Bildpunktdichte.
- * „Dynamic Random Access Memory“, wörtlich „dynamischer Speicher mit Direktzugriff“; Arbeitsspeicher eines Computers.
- * Im Original „feature size“; bezeichnet den Durchmesser der kleinsten herstellbaren Einzelkomponente, z.B. die Breite einer Leiterbahn bei

der fotolitografischen Produktion von Halbleiterbauteilen.

- * Kurzweil referiert auf den bekannten Vers „Rose is a rose is a rose is a rose“ aus dem 1913 geschriebenen, 1922 veröffentlichten Gedicht „Sacred Emily“ der US-amerikanischen Schriftstellerin Gertrude Stein (1874–1946).
- * Im Original „transistor cycle“; Kosten pro Hertz und Transistor.
- * Millionen Instruktionen pro Sekunde – nicht die Taktfrequenz, denn eine Instruktion kann mehrere Takte dauern.
- * FLOPS: „floating-point operations per second“; Gleitkommaoperationen (z.B. Addition/Multiplikation reeller Zahlen) pro Sekunde.
- * Zu deutsch: „Optisches Schalten“; gemeint sind aktive Komponenten (z.B. Switches) in Glasfasernetzen.
- * Im Original nur „existence“ (ohne „physikalisch“).
- ** Äußere Elektronen eines Atoms, die jeweils eine Bindung mit einem anderen Atom eingehen können.
- * Im Original: „computation rules“; gemeint sind nicht arithmetische Gesetze, sondern algorithmische Abläufe.
- * Variablen oder mathematische Funktionen sind „stetig“ (engl. „continuous“), wenn sie auf der Gesamtheit der reellen Zahlen beruhen, anstatt auf diskreten (d.h. ganzzahligen) Werten.
- ** Im Original „computationally equivalent“; soviel wie: zu denselben (qualitativen) Berechnungsleistungen in der Lage.
- * Im Original „economic imperative“, wörtlich etwa „Wirtschaftlichkeitsgebot“, hier freier übersetzt mit „Wachstumsdruck“. Jedes Produkt unterliegt dem Druck, lukrativ zu sein, und muss sich stets weiterentwickeln („wachsen“), da es sonst von Konkurrenzprodukten überholt wird.
- * „Fühlbar“; für die taktile Wahrnehmung (Tastsinn).
- * Englisch für „Immobilien“ (wörtl. etwa: „wahres Eigentum“).
- * „K-12“ bezeichnet den US-amerikanischen Bildungsweg vom Kindergarten bis zur zwölften Klasse.
- * Mittlerweile sogar in deutscher Sprache.
- * Halbleiter-Grundplatte für integrierte Schaltkreise.
- * Im Original: „Self-Assembly“. Oft auch „Selbstassemblierung“.
- * Als „top-down“ („von oben nach unten“) werden Planungsmethoden

bezeichnet, die von einem abstrakten Gesamtkonzept ohne konkrete Details ausgehen; eine „bottom-up“-Planung („von unten nach oben“) hingegen beginnt im Detail, ohne übergeordnete Ziele.

** Wörtlich „Ziegel“.

* „Single Instruction Multiple Data“; zu deutsch: „eine Anweisung, viele (verschiedene) Daten“.

* „Multiple Instruction Multiple Data“; zu deutsch: „viele Anweisungen, viele Daten“.

* 2012 veröffentlichte Ray Kurzweil mit *How to Create a Mind: The Secret of Human Thought Revealed* seine Überlegungen zum gegenwärtigen Stand des Reverse Engineering des Gehirns. Die deutsche Übersetzung erschien 2014 unter dem Titel *Das Geheimnis des menschlichen Denkens. Einblicke in das Reverse Engineering des Gehirns* bei Lola Books.

* „Application-Specific Integrated Circuit“, zu deutsch: „Anwendungsspezifischer Computerchip“.

** Im Englischen: „mesh computing“, wörtlich etwa: „Vernetzte Berechnung“.

* Oft auch: „Reversible Computing“.

* Zu deutsch: „geschlossene zeitartige Kurven“.

* „Computational Neuroscience“ ist als Teilgebiet der Neurobiologie eine interdisziplinäre Wissenschaft, die sich mit den informationsverarbeitenden Eigenschaften des Nervensystems beschäftigt.

* Englisch: „chaos computing“.

* „Emergenz“ bezeichnet das Entstehen von Strukturen oder Verhalten eines Systems, die nicht direkt durch Eigenschaften seiner Komponenten erklärbar sind.

* Zu deutsch etwa: „auslösende Merkmale“.

* „Regional Cerebral Blood Flow“, zu deutsch: „regionale Gehirndurchblutung“.

* Englisch: „two-photon laser scanning microscopy“ (TPLSM).

* Teilbereich der Neurowissenschaft, der sich mit Informationsverarbeitung im Nervensystem beschäftigt.

* Zu deutsch: „Was gemeinsam feuert, wächst zusammen.“

* Zu deutsch: „Versuch und Irrtum“; Lernen durch Ausprobieren.

- * Englisch: „mirror system hypothesis“.
- * Ist ein System „skalierbar“, so lässt sich seine Leistung durch Hinzufügen zusätzlicher Hardware beliebig steigern.
- * Auch unter dem Namen „Alagebrium“ bekannt. Im Original „phenacyldimenthylthiazolium chloride“, mit einem fehlerhaften „n“ zuviel.
- * Zu deutsch etwa: „Es gibt eine Menge Luft nach unten“.
- * „Computer-aided Design“; zu deutsch: „rechnergestützte Konstruktionsplanung“.
- * „Biologische mikroelektromechanische Systeme“
- * Zu deutsch: „allgemeiner Problemlöser“.
- * Datamining (wörtl. „Datenbergbau“) ist das „Schürfen“ nach versteckten Zusammenhängen in Daten.
- * Zu deutsch: „WähleBestenNächstenZug“.
- * Pruning (wörtl. „Stutzen“, „Zurechtschneiden“ [von Pflanzen]) bezeichnet die oben beschriebene Terminierung von Entscheidungsbäumen.
- * „Application-Specific Integrated Circuits“, zu deutsch: „Anwendungsspezifische Computerchips“.
- * „Brute-Force“ (wörtl. „rohe Gewalt“) ist das stupide „Durchprobieren“ aller Möglichkeiten.
- * „Moving Object and Transient Event Search System“. Zu deutsch etwa: „Suchsystem für bewegliche Objekte und Durchflugereignisse“.
- * „Computerized Physician Order-Entry“, zu deutsch etwa: „Computererfassung von ärztlichen Anweisungen“.
- * „Securities Observation, News Analysis, and Regulation“, zu deutsch: „Sicherheitsüberwachung, Analyse von Neuerungen und Regulierung“.
- * Im Englischen „mind“.
- * Zu deutsch etwa „Erfahrungsprojizierer“.
- ** „Calculations per second“, zu deutsch: „Rechenschritte pro Sekunde“.
- * „Document and Image Storage Invention“, zu deutsch „Erfindung zur Dokument- und Bildverwahrung“.
- * „Tactical autonomous combatants“, wörtl.: „Taktische autonome Krieger“; soviel wie ein Kampfroboter.
- * „Search for Extraterrestrial Intelligence“, zu deutsch: „Suche nach

außerirdischer Intelligenz“.

- * Im Original ebenfalls deutsch: „Ich bin ein Singularitarian“.
- * Klingt englisch ausgesprochen wie „Why are you you?“, zu deutsch: „Warum bist du du?“.
- * „Pattern“ ist das englische Wort für „Muster“.
- * *E. coli* ist ein Bakterium, kein Virus.
- * Im Original: „existential risks“.
- * Soviel wie „Rundfunk-“ oder „Sammelbefehl“-Architektur.
- * Im Original „telephone switchboard“ – Apparat zur manuellen Fernvermittlung.
- * Im Original: „aspirations“.
- ** Im Original: „capability“; zu deutsch auch „Fähigkeit“ oder „Vermögen“.
- * Die deutsche Bezeichnung für eine „mathematische Singularität“ ist eigentlich „Definitionsücke“.