

Ulrich C. Schreiber

# Das Geheimnis um die erste Zelle

Dem Ursprung  
des Lebens  
auf der Spur

SACHBUCH

EBOOK INSIDE



Springer

# Das Geheimnis um die erste Zelle

Ulrich C. Schreiber

# Das Geheimnis um die erste Zelle

Dem Ursprung des Lebens auf  
der Spur



Springer

Ulrich C. Schreiber  
Fakultät für Biologie  
Universität Duisburg-Essen  
Essen, Nordrhein-Westfalen  
Deutschland

Ergänzendes Material zu diesem Buch finden Sie auf <https://www.springer.com/de/book/9783662591826>

ISBN 978-3-662-59182-6      ISBN 978-3-662-59183-3 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59183-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019  
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.  
Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.  
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Sarah Koch  
Einbandabbildung: Deblik, Berlin

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature  
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Leben ist ein (Kolk-)Strudel im Strom der Entropie*  
Ulrich C. Schreiber, 11.02.2019

*Für Karin, Hanna und Sebastian*

# Vorwort

Es ist ein Wagnis, ein Projekt über die Entstehung des Lebens zu starten. Schnell werden auf der Suche nach Zugängen und Lösungen Grenzen sichtbar, die unüberwindbar scheinen. Es sind vor allem die des eigenen Wissens. Die Entstehung des Lebens ist kein Forschungsobjekt, das sich in seiner Fülle nur der Biologie, Chemie oder der Biochemie zuordnen lässt. Die Summe aller Fragen, die sich bei der Suche nach Antworten stellen, berührt eine Vielzahl von wissenschaftlichen Disziplinen und hierbei, wie sich schnell herausstellte, besonders die der physikalischen Chemie und der Geologie. Vielleicht ist dies auch der Grund, aus dem die Antworten der Wissenschaft bislang so wenig überzeugend waren. Es fehlte häufig die breit aufgestellte Forschergruppe, die für die Bearbeitung aller Aspekte unbedingt erforderlich ist. All dies wurde schnell deutlich, nachdem im Jahr 2003/2004 die Idee geboren war, einen eigenen und gänzlich neuen Forschungsansatz für die Entstehung

organischer Moleküle in den Bruchzonen der kontinentalen Kruste und letztlich des Lebens zu verfolgen. Es war Oliver Locker-Grütjen, der Leiter des Science Support Centers der Universität Duisburg-Essen, den ich als Ersten mit dieser Überlegung vertraut machte. Wir stimmten schnell überein, dass Spezialisten aus allen Naturwissenschaften nötig waren, um überhaupt eine Chance auf neue Erkenntnisse oder Antworten zu dieser Frage zu erhalten. Im Alleingang war ein solches Unterfangen undenkbar. Oliver Locker-Grütjen kannte viele Kollegen aus verschiedenen Fachbereichen und konnte einschätzen, wer möglicherweise bereit war, sich unkonventionell mit dieser Thematik zu befassen. Nach kurzer Zeit fanden sich mehr als zehn Professoren zusammen, die so viel Interesse an der Frage nach der Entstehung des Lebens hatten, dass sie in Abständen von mehreren Monaten trotz zeitlicher Vollausslastung bereit waren, abends an privat organisierten Treffen teilzunehmen: Die Essener Arbeitsgruppe „Origin of Life“ war geboren.

Seitdem ist viel passiert. Das vorliegende Buch gibt einen Stand der Forschung wieder und – so viel sei vorweggenommen – zeigt anhand eines hypothetischen Modells einen gänzlich neuen Weg für die Bildung einer ersten teilbaren Zelle auf – und dies unter Bedingungen, die realistisch sind und zu gewissen Teilen heute noch in gleicher Umgebung erfolgen. Das Werk erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Ausschließlichkeit. Aber es kann helfen, Verständnis für notwendige Prozesse zu entwickeln, die zu neuen Experimenten und einem tieferen Zugang dieser wirklich komplexen Materie führen. Denn so viel ist sicher: Bis auf die Anfänge des Universums ist seit Beginn der wissenschaftlichen Zeitrechnung keine naturwissenschaftliche Frage so ungeklärt geblieben wie die über die Entstehung des Lebens.



Jetzt kann es beginnen.

Und noch ein Hinweis: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit verwende ich in diesem Buch überwiegend das generische Maskulinum. Dies impliziert immer beide Formen, schließt also die weibliche Form mit ein.

März 2019

Ulrich C. Schreiber

# Danksagung

Ein thematisch weitreichendes Sachbuch wie das vorliegende hat eine lange Vorgeschichte. Es gründet sich neben Forschungen im Labor und im Gelände auf viele Treffen und Diskussionen mit Kollegen, in der Universität, auf Tagungen und im privaten Bereich. Allen, die Hinweise, Korrekturen und Hilfestellungen zur Abfassung dieses Sachbuches oder auch Diskussionsbeiträge und Unterstützung in den vorangegangenen Jahren geleistet haben, sage ich meinen herzlichsten Dank. Es sind alphabetisch gereiht die Kolleginnen und Kollegen Prof. Peter Bayer, Prof. Steven A. Benner (Florida), Prof. Volker Buck, Dr. Maria Davila Garvin, Prof. Gerald Dyker, Prof. Matthias Epple, Prof. Hans-Curt Flemming, Prof. Daniel Hoffmann, Prof. Gerhard Jentzsch, Prof. Frank Keppler, Prof. Ute Klammer, Prof. Ralf Littke, Dr. Oliver Locker-Grütjen, Prof. Christian Mayer, Prof. Franco Pirajno (Perth), Prof. Agemar Siehl, Prof. Torsten Schmidt, Prof. Oliver J. Schmitz, Prof. Heinfried Schöler,

#### **XIV       Danksagung**

Prof. Jörg Schröder, Prof. Bernd Sures, Dr. Jonathan Williams und die vielen konstruktiven Tippgeber, die sich im Laufe der Jahre zu diesem Thema geäußert haben. Meinen besonderen Dank spreche ich der Leitung der Universität Duisburg-Essen aus, die das Projekt engagiert unterstützt hat.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Die Entstehung des Lebens – warum ist die Frage danach für uns so wichtig?	1
1.2	Was ist eigentlich Leben?	4
1.3	Wer war LUCA?	7
1.4	Der Einstieg	10
	Literatur	19
<b>2</b>	<b>Globale Voraussetzungen</b>	<b>21</b>
2.1	Erste Voraussetzung: Die Planeten und eine Sonne mit System	21
2.2	Zweite Voraussetzung: Die Erde – eine Materialsammlung für den Start	24
2.3	Dritte Voraussetzung: Das Wasser	30
2.4	Vierte Voraussetzung: Eine dauerhafte Atmosphäre	32
2.5	Wie ging es weiter?	36
	Literatur	44

<b>3</b>	<b>Die engeren Rahmenbedingungen: Die Chemie, die Physik und die physikalische Chemie, ohne sie geht es nicht</b>	<b>47</b>
3.1	Die chemischen Ressourcen des Lebens	47
3.2	Die Chemie hat ihre eigenen Gesetze	55
3.3	Katalysatoren beschleunigen die Reaktion erheblich	57
3.4	Verdünnung – keine Reaktion ohne Konzentration	59
3.5	Entropie und kein Ende	61
3.6	Chiralität – was ist das denn?	65
	Literatur	70
<b>4</b>	<b>Wirklich hilfreich: Ein kurzer Abriss zu Abläufen in heutigen biologischen Zellen</b>	<b>71</b>
4.1	Das Problem der Eingrenzung	71
4.2	Der Informationsspeicher, ohne Nullen und Einsen	79
4.3	Wie wird in der Zelle die gespeicherte Information umgesetzt?	85
	Literatur	94
<b>5</b>	<b>Die bisherigen Modelle: Das Sichten des großen Nebels</b>	<b>95</b>
5.1	Von der Antike bis zur modernen Wissenschaft	96
5.2	Die modernen Anfänge	97
5.3	Der Versuch von Harold C. Urey und Stanley L. Miller	98
5.4	Der Damm war gebrochen	101
5.5	„Black Smoker“ – eine Parallelwelt	102
5.6	Eine neue Entdeckung – die „White Smoker“	105
5.7	Die Suche ging weiter – warme Tümpel	109

5.8	Panspermie – Weltraumsamen	114
5.9	Weitere Überlegungen	119
	Literatur	120
<b>6</b>	<b>Die RNA-Welt: Der Start mit einem ganz besonderen Molekül?</b>	123
6.1	Die RNA, ein Molekül mit Fähigkeiten	123
6.2	Probleme der RNA-Welt	128
	Literatur	129
<b>7</b>	<b>Das neue Modell: Hydrothermale Systeme der frühen kontinentalen Kruste</b>	131
7.1	Die kontinentale Kruste – zerbrechlich und gestört	131
7.2	Überkritische Gase – Dampf unter Druck?	142
7.3	Es gibt ihn doch: Ein Nachweis aus der Natur	152
7.4	Sie sind möglich: Experimente zum Krustenmodell	157
	Literatur	166
<b>8</b>	<b>Ein hypothetischer Ansatz: Hydrothermale Systeme der frühen kontinentalen Kruste</b>	167
8.1	Die Suche nach dem Weg	167
8.2	Phase I – Bildung und Anreicherung	173
8.3	Phase II – der Auswahlprozess	180
8.4	Phase V (vorgezogen) – ein möglicher Start des Lebens	187
8.5	Phase VI – LUCA wird sichtbar	208
8.6	Phase III – Anleihen an die RNA-Welt	216
8.7	Phase IV – der Lückenschluss	224
8.8	Kann es so gewesen sein?	233
	Literatur	238

## **XVIII      Inhaltsverzeichnis**

<b>9</b>	<b>Nach LUCA: Wie ging es weiter?</b>	241
9.1	Der Siegeszug beginnt	241
9.2	Der Kontakt unterschiedlich entwickelter Zellen	244
9.3	Und die Viren?	247
	Literatur	248

## Zusatzmaterial

Ein zusammenfassendes Poster (auf Englisch) ist abrufbar unter: <https://www.springer.com/de/book/9783662591826>

From Molecules to Pre-LUCA-World

Ulrich C. Schreiber, Christian Mayer

Auf der gemeinsamen Tagung der Deutschen Astrobiologischen Gesellschaft (DAbG) und der European Astrobiology Network Association (EANA) vom 24. bis 28. September 2018 wurde erstmals eine unter realistischen Bedingungen mögliche Entwicklung einer Zelle aus einfachen organischen Molekülbausteinen vorgestellt. In dem Poster sind sechs Entwicklungsstadien skizziert, die sich auf fluidführende Bruchzonen der kontinentalen Kruste projizieren lassen. Schwerpunkt ist die Tiefe von ca. 700 bis 1000 m, in der in  $\text{CO}_2/\text{N}_2$ -führenden Mofetten der Übergang von überkritischen zu unterkritischen Gasen erfolgt. Druckschwankungen durch Erdzeiten oder Kaltwassergeysirausbrüche variieren die Tiefenlage des Phasenübergangs.





# 1

## Einführung

### Inhaltsverzeichnis

1.1	Die Entstehung des Lebens – warum ist die Frage danach für uns so wichtig? .....	1
1.2	Was ist eigentlich Leben? .....	4
1.3	Wer war LUCA? .....	7
1.4	Der Einstieg .....	10
	Literatur .....	19

### 1.1 Die Entstehung des Lebens – warum ist die Frage danach für uns so wichtig?

Können wir als Menschen nicht einfach akzeptieren, dass das, was vor Urzeiten einmal gebildet wurde, heute vorhanden ist, ohne genau zu wissen, wie und warum? Nein, das können wir nicht. Die Entwicklung des Menschen und somit die Entwicklung eines abstrakt denkenden

Organs, des Gehirns, führt zwangsläufig zu Fragen über alles, was in dem Umfeld dieses Gehirns passiert. Das war seit einem bestimmten Zeitpunkt der Entwicklung immer so. Es gab Fragen, die instinktiv beantwortet werden konnten. Warum erkennt in dem einen Fall das Wild kurz nach dem Eintreffen des Jägers, dass dieser naht? In einem anderen Fall bei gleicher Deckung und gleicher Distanz ist es unbekümmert und lässt sich leicht erlegen. Die Antwort brachte die Erfahrung, die nach vielen Versuchen zeigte, dass die Windrichtung die entscheidende Rolle spielte. Andere Fragen, über die Ursachen von Blitz und Donner, Regenbögen, Krankheit, Tod und vieles anderes waren nicht zu klären und wurden als gegeben akzeptiert. Sie fanden ihren Platz im Bereich des nicht Beherrschbaren, des Göttlichen, über dem Menschen Stehenden. Es war eine sehr erfolgreiche Methode, um die Belastung der Psyche mit zurzeit nicht zu beantwortenden Fragen zu verringern.

Mit der Etablierung naturwissenschaftlicher Prinzipien im menschlichen Denken änderte sich die Art der Beantwortung von Fragen. Eine stimmige Antwort verlangte einen Nachweis, der reproduzierbar und allgemeingültig war. Eine Aussage über die Anziehungskraft der Erde musste auf jedem Kontinent oder im Falle der Ozeane auch auf Schiffen gültig sein. Für uns ist es heute eine Selbstverständlichkeit, dass Gegenstände überall auf der Erde im freien Fall in Richtung des Erdmittelpunktes beschleunigt werden. Das zugehörige physikalische Gesetz, das Newton in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts formulierte, ist als Gravitationsgesetz bekannt und wurde im 20. Jahrhundert durch Einsteins allgemeine Relativitätstheorie ergänzt. Durch diese naturwissenschaftlichen Gesetze wissen wir, dass Massen sich gegenseitig anziehen, überall, im gesamten Weltall. Kein noch so charismatischer Heilsversprecher oder Verschwörungstheoretiker

kann heute der breiten Bevölkerung vorgaukeln, dass es auf dem Mond oder anderen Planeten nicht der Fall ist.

Die naturwissenschaftliche Denkweise führte dazu, dass die Dinge, die über lange Zeit als gegeben akzeptiert waren, dem göttlichen Modell nach und nach entrissen wurden. Es ist den Naturwissenschaften zu verdanken, dass wir nur noch wenige Dinge in unserer Gedankenwelt haben, deren Erklärung von einem Teil der Bevölkerung als von Gott geschaffen angesehen wird. Der eine Punkt hierbei ist der Urknall, der sich vor einigen Jahrzehnten als ein Erklärungsmodell für die Entstehung des Weltalls etabliert hat und eine Besonderheit darstellt. Es ist überhaupt erst der Physik zu verdanken, dass dieser Aspekt auf die Tagesordnung gesetzt wurde. Er eröffnet ein Dilemma, das durch folgende Tatsache begründet ist: Das Erklärungsmodell Urknall ist das Ergebnis einer konsequenten physikalischen Betrachtung der Prozesse, die nach dem postulierten Urknall bis in die heutige Zeit stattgefunden haben, ohne göttliches Einwirken. Die Schwierigkeiten, den eigentlichen Start des Urknalls physikalisch zu beschreiben, werden aber selbst von einigen Naturwissenschaftlern als Grund genommen, diesen Punkt als gottgegeben zu fordern – wieder, weil es noch keine eindeutige Erklärung hierfür gibt. Inzwischen wurden für die Entstehung des Weltalls alternative Vorstellungen entwickelt, die ein unendlich schwingendes Ausdehnen und Zusammenziehen beinhalten, ohne dass es dabei zu einem einzigen Urknall als Anfangsstadium gekommen sein muss [1, 2]. Einfacher ist es durch diesen Ansatz nicht geworden.

Der zweite ungeklärte Punkt ist die eingangs gestellte Frage, wie das Leben auf der Erde entstanden ist. Es ist die Frage, die vermutlich die Menschheit bewegt, seitdem sie die Fähigkeit besitzt, Fragen zu stellen. Hiermit verbunden sind unmittelbar das „Warum?“, das „Wohin?“ und die

Überlegung, welchen Sinn das Leben überhaupt hat. In einer Welt, in der es intelligente, denkende Wesen gibt, aber naturwissenschaftliche Prinzipien unbekannt sind, müssen Lösungen für die Beantwortung großer Fragen auf andere Art und Weise gefunden werden. Die Lösung hieß von Beginn an Religion. Sie gab und gibt auch heute noch Antworten für die Themen, die nicht mit einfachen Erfahrungen der Alltagswelt für jeden selbst erschlossen werden können. Hierbei kommt es nicht auf den Wahrheitsgehalt oder die Reproduzierbarkeit der Aussagen an. Wichtig ist das Beruhigen der eigenen Unsicherheit und des Angstgefühls, die durch das Nachdenken in diesen „unfassbaren“ Sphären unweigerlich entstehen.

## 1.2 Was ist eigentlich Leben?

Neben grundsätzlichen Kenntniskennissen hat erst die Naturwissenschaft dazu beigetragen, die Komplexität des Lebens darzustellen und eine Fülle von unbeantwortbar scheinenden Fragen aufzuwerfen. Hierbei zeigte sich, dass das für uns so selbstverständlich existierende Leben erstaunlicherweise nur schwer zu definieren ist.

Brauchen wir uns nicht einfach nur umzusehen, um zu erkennen was Leben ist? Nein, so einfach ist es nicht. Es gibt noch keine allumfassende Definition in der Wissenschaft, die das Leben und somit auch den Startpunkt des Lebens erklärt. Hierin besteht ein großer Unterschied zur Chemie und Physik, für die es zum Beispiel Theorien zur Erklärung von Materie oder von wirkenden Kräften gibt. Aber man kann Kriterien bzw. Kennzeichen angeben, die zumindest Schlüsselmerkmale des Lebens darstellen und von allen Disziplinen der Naturwissenschaften akzeptiert werden. Es sind zwangsläufig diejenigen physikalisch-chemischen Eigenschaften, die ein lebendes biologisches

System ausmachen. Und hier wird bereits sichtbar: Es soll sich um ein System handeln, das unseren Kenntnissen der Biologie entspricht. Sicher können einige der Kennzeichen auch in nicht biologischen Systemen auftreten; die Kombination und Gleichzeitigkeit aber schärft die Definition zu einer Beschreibung des Lebens.

An erster Stelle des Kriterienkatalogs steht die Existenz mindestens einer Zelle, ein Kompartiment, das durch eine Zellmembran umschlossen ist. Hierin finden die biochemischen Reaktionen statt, die verhindern, dass die Zelle abstirbt, oder, anders ausgedrückt, die dafür sorgen, dass sie am Leben bleibt. Für die biochemischen Reaktionen werden ein Informationsspeicher, ein Stoffwechsel zur Aufnahme von Energie und zum Austausch von Molekülen aus der Umgebung sowie Katalysatoren für effiziente chemische Reaktionsketten vorausgesetzt. Mit einer genau abgestimmten Regulation führt das Zusammenspiel aller Komponenten zur Reproduktion der Zellbestandteile, zu Wachstum und Vermehrung der Zelle durch Teilung. Hinzu kommt die Fähigkeit zur Anpassung an veränderte Umweltbedingungen und zur Entwicklung zu komplexeren Molekülgruppen.

Hierzu ein kleiner Randgedanke: Was wäre, wenn wir alle funktionierenden Zellbestandteile von Trilliarden Zellen (bis auf die Zellmembranen) in einen großen Behälter oder in ein fast geschlossenes Loch in der Erde geben und mit Energie, Zu- und Abfuhr von notwendigen Molekülen versorgen? In diesem Behälter würden alle Prozesse, die sonst in einer Zelle ablaufen (aber ohne zellmembran-bezogene Reaktionen) weiter stattfinden. Die vervielfältigten Produkte könnten über Fließwege in andere Räume gelangen und sich somit insgesamt vermehren. Würden wir dieses System Leben nennen? Wir könnten uns auf den Standpunkt stellen, nicht darüber nachdenken zu müssen, weil der Molekülcocktail sich natürlich nicht

vermehrten kann. Aber der Gedanke ist trotzdem wichtig, weil wir am Ende dieses Buches Modellvorstellungen über die Anfänge der organischen Chemie bis zu Bildung von Vesikeln und Zellen bekommen, die genau so einer Situation nahekomen und einer Abgrenzung bedürfen.

Der theoretische Physiker Gerald Feinberg und der Chemiker Robert Shapiro versuchten bereits 1980 das Prinzip Leben allgemeingültig auch für andere mögliche Lebensformen im Weltall zu fassen. Sie kommen zu dem Schluss, dass das Leben durch Wechselwirkungen zwischen freier Energie und Materie entsteht. Die Materie ist auf diese Weise imstande, eine größere Ordnung innerhalb des gemeinsamen Systems zu erreichen [3].

Heute können wir uns eine Kolonie von Robotern vorstellen, welche die Rohstoffe, aus denen sie bestehen, selbstständig gewinnen, zu Bauteilen verarbeiten und mit ihnen sich selbst reproduzieren. Sie hätten eine Computersteuerung, jeder für sich eine äußere Hülle und zur Energiegewinnung Solarzellen am Körper. Der Stoffwechsel wäre durch die gesamte Kolonie definiert, eine künstliche Intelligenz würde die Anpassung an veränderte Umweltbedingungen gewährleisten. Das Gros der Bauteile könnte sogar aus organisch-chemischen Komponenten bestehen. Im Unterschied zum biologischen Leben, das sich auf physikochemischer Grundlage selbst entwickelt hat, wäre eine Roboterkolonie das Ergebnis einer Erschaffung durch den Menschen. Würden wir diese Kolonie dem Leben zurechnen?

Es wird sichtbar, dass es Grenzbereiche gibt, die einer längeren Diskussion bedürfen. Von einem bestimmten Zeitpunkt an war der Schritt zum Leben, so, wie wir es kennen, vollzogen. Im Zeitraum davor muss ein Übergang von der rein physikochemischen zur informationsgesteuerten organischen Molekülbildung stattgefunden haben. Dieser wichtige Zeitabschnitt wird in Abschn. 8.3

weiter eingegrenzt. Zwei weitere Beispiele sollen zeigen, wie schwierig es ist, das Leben eindeutig mit wenigen Worten zu beschreiben. Eine Expertengruppe um den Chemiker Gerald Joyce prägte die Definition: „Leben ist ein sich selbst erhaltendes chemisches System, welches die Fähigkeit zur Darwinschen Evolution besitzt.“ [4] Sie wird auch von der US-Raumfahrtbehörde NASA als Arbeitsdefinition geführt. Stuart Kauffman, ein US-amerikanischer theoretischer Biologe, sieht dagegen die Selbstorganisation im Mittelpunkt: „Leben ist ein zu erwartendes, kollektives Vermögen katalytischer Polymere zur Selbstorganisation.“ [5].

Die Definitionen von Joyce und Kauffman stellen die chemischen Systeme in den Vordergrund, die somit technische Formen der Selbstorganisation ausgrenzen. Die Definition von Kauffman ließe allerdings das Gedankenexperiment der Molekülsuppe in einem größeren Gefäß durchaus als Leben zu. Die Gemeinschaft von Robotern, die letztlich durch Menschen erschaffen werden könnte, würde nach biologischen Gesichtspunkten schon fast an Leben heranreichen.

Die Suche nach einer Definition ist aus dem Blickwinkel der Astrobiologie bedeutend, da auf der Suche nach Leben im Weltraum die Frage auftauchen könnte, welche Anzeichen für Leben wir als solches akzeptieren können.

### 1.3 Wer war LUCA?

Wir haben aufgrund biochemischer Daten gute Gründe anzunehmen, dass sämtliche auf der Erde existierenden Lebewesen von nur einem einzigen Vorfahren abstammen. Es muss eine Zelle gewesen sein, die es zum ersten Mal schaffte, zu wachsen und sich zu teilen, ohne dass die

Tochterzellen gleich wieder abstarben. Die Nachkommen mussten so lange überleben, bis sie sich selbst wieder geteilt hatten – ein Prozess, der bis heute fort dauert. Diese erste Zelle wird LUCA genannt (Last Universal Common Ancestor), der letzte gemeinsame Vorfahre aller lebenden Pflanzen, Pilze und Tiere, inklusive der Menschen. Für die Bildung von LUCA muss es bereits lange vorher eine fortwährende Produktion von Molekülen gegeben haben, die die notwendigen Grundbausteine für das Experiment Leben bereitstellten. Hierzu gehören die organischen Basen wie Adenin oder Guanin, Aminosäuren oder die Lipide, die für den Aufbau der Zellwände erforderlich sind.

Bausteine allein reichen aber nicht. Benötigt wurden Reaktionsräume, in denen die Versuche zum Zusammenbau komplexerer Verbindungen ablaufen konnten. Es reichten kleine Kavernen oder Porenräume, in denen eine Anreicherung der Moleküle stattfinden konnte. Ihre Konzentration muss mindestens so hoch gewesen sein, dass sie sich untereinander genügend oft trafen und miteinander reagieren konnten. Gefordert war eine sehr große Anzahl von kleinsten Laboratorien – untereinander verknüpft, mit wechselnden Bedingungen, Materialnachschub und einer Müllabfuhr für nicht brauchbare Bestandteile. Hohe Molekülkonzentrationen bergen allerdings auch ein neues Problem: Die Variation, die Anzahl unterschiedlicher Moleküle ist so groß, dass es besonderer Prozesse der Auswahl bedarf, um für das Leben funktionsfähige Verbindungen herauszukristallisieren. Unter solchen Bedingungen muss sich die biologische Zelle LUCA gebildet haben, das erfolgreichste System, das jemals auf der Erde entstanden ist. Von ihr ausgehend wurde fortan der Planet Erde in eine einzigartige Entwicklung geführt.

Die Zusammensetzung der Atmosphäre änderte sich durch Photosynthese betreibende Bakterien und Pflanzen



deutlich. Während Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) verringert wurde, stieg der Sauerstoffgehalt kontinuierlich an. Organische Säuren, später Pflanzenwurzeln und tierische Aktivitäten trugen zu einer stärkeren Verwitterung bei. Die Folge war auf der einen Seite eine verstärkte Erosion, auf der anderen Seite mit Einsetzen einer Bodenentwicklung und der Ausbildung einer Pflanzendecke eine Verzögerung der Abtragungsprozesse. Hierdurch änderten sich der Wasserhaushalt der Fließgewässer, die Art der Sedimente und deren Transport. Organogene Sedimente wie Kohle und Riffkalke entstanden, was über den Kohlenstoffdioxidhaushalt wieder direkten Einfluss auf die Zusammensetzung der Atmosphäre hatte.

Und schließlich trat der Mensch auf die Bühne, der in kurzer Zeit Veränderungen herbeiführte, die in ihrer Tragweite nur noch mit einem großen Meteoriteneinschlag zu vergleichen sind. Alles was wir heute auf der festen Erdoberfläche sehen, ist letztlich das Ergebnis der erfolgreichen Vermehrung von LUCA. Selbst Gebirge hätten ohne LUCA heute ein anderes Aussehen, frei von biogenen Kalksteinen und oxidierten Eisenmineralen, mit anderen Erosionsformen und ohne Flechten und Bakterienfilme. Es gibt vielleicht eine kleine Ausnahme, die wir noch erkennen können. Es sind die ganz jungen Vulkanbauten, die ohne Bewuchs aus der Landschaft ragen. Aber auch hier hat an vielen Stellen LUCA bereits seine Finger im Spiel gehabt. Weithin sichtbar sind die häufig roten Oberflächen der Laven, deren eisenhaltige Minerale durch den Luftsauerstoff oxidiert wurden. Sie sind Belege einer Veränderung der Atmosphäre, die vor mehr als 2,4 Mrd. Jahren eingesetzt hat, als die massenhafte Produktion von Sauerstoff durch Cyanobakterien zu einer ständig wachsenden Konzentration in der Lufthülle führte.

## 1.4 Der Einstieg

„Wie ist eigentlich das Leben entstanden?“ Diese Frage ging in die kleine Runde aus Wissenschaftlern, die sich in Essen in der Mensa der Universität zum ersten Mal versammelt hatten. Die Kollegen sahen sich an und zuckten die Schultern. „Das ist viel zu lange her, um es herauszufinden. Man kann doch nur spekulieren, nichts ist richtig fassbar, sämtliche Rahmenbedingungen liegen völlig im Nebel“, so die einhellige Meinung. „Aber dazu treffen wir uns gerade, um überhaupt erst einmal darüber zu sprechen“, überlegte einer der Kollegen. „Ich habe da so einen Verdacht“, warf ich vorsichtig ein und begann mit einem Bleistift auf einer Serviette das Modell einer tektonischen Bruchzone zu skizzieren ...

Haben wir uns die Frage nach der Lebensentstehung nicht alle schon einmal gestellt? Jedenfalls diejenigen von uns, die naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten als die Basis unserer Existenz ansehen? Die bisherigen Antworten sind schwammig. Und es geht nicht nur um den Beginn des Lebens. Genauso wichtig ist es, die Startphase des Planeten zu klären, von der überhaupt erst die Voraussetzungen geschaffen wurden, dass das Leben entstehen konnte. Und noch weiter zurückblickend ist der Anfang des Sonnensystems von elementarer Bedeutung. Mit seiner Entwicklung sind entscheidende Einflüsse verbunden, die bis heute grundlegende Prozesse auf der Erde bestimmen. Die Anfänge liegen so weit zurück, dass wir zu wenig von der jungen Erde wissen, über die Einflüsse von außen, über die Prozesse im Erdinneren und an der Oberfläche. Es gibt zahlreiche Hypothesen zum Leben, keine ist allgemein anerkannt. Schnell drängte sich der Schluss auf, dass die Frage nach dem Ursprung des Lebens eine der kompliziertesten der Wissenschaft ist. Unlösbar! Also lassen wir es darauf beruhen?

Nein, lassen wir nicht – so die einhellige Meinung der Kollegen, die sich nach der ersten Mensarunde mit einer neuen Idee für den Entstehungsort des Lebens von jetzt an regelmäßig mit mir trafen. Es war der Reiz, an etwas völlig Unbekanntem, mit unendlich vielen Fragezeichen behaftetem zu forschen. Dies verband die Gruppe, ohne dass es einen Zwang gab, zu einem bestimmten Zeitpunkt Ergebnisse abliefern zu müssen. Allein die Neugier zu befriedigen, vielleicht einen kleinen Abschnitt im Prozess zu erkennen und einen ersten Schritt in Richtung einer möglichen Lösung zu gehen – das war die Sache wert.

Die Suche nach einem Einstieg in das Thema „Ursprung des Lebens“ machte aus naturwissenschaftlicher Sicht sofort deutlich, dass die Komplexität des Lebens von nichts anderem, das wir kennen, übertroffen wird. Das Leben umfasst unser gesamtes irdisches Weltbild. Es ist in seiner Vielschichtigkeit so weit entwickelt, dass zum Erkennen einzelner Abläufe einfache Erklärungsversuche fast unmöglich scheinen. Für die Entwicklung bis zum Jetzt war Zeit notwendig, eine Zeit, die jeden menschlichen Erfahrungshorizont unendlich weit übersteigt. Vielleicht 3,5 Mrd., vielleicht 3,8 Mrd. Jahre oder mehr. Dieser gewaltige Zeitraum, der anscheinend für die Entwicklung eines abstrakt denkenden Wesens notwendig war, macht den Zugang zum Verständnis über die ersten Schritte bis zum Heute so schwierig. Gerade die Anfangsphase liegt in einem dichten Nebel, der undurchdringbar scheint. Es gab bislang zu viele Unbekannte, die das Umfeld der Lebensentstehung so kompliziert machen. Was wissen wir eigentlich genau über die Bedingungen der frühen Erde? Welche Zusammensetzung hatte die Uratmosphäre oder das Wasser des Urozeans? Welche Anteile organischer Moleküle kamen aus dem Weltall mit den Meteoriten oder Kometen, wie viel Landoberfläche gab es bis zu welchem Zeitpunkt? Welchen Einfluss hatte der Mond nach seiner Bildung?

Neben planetaren und geologischen Unbekannten stehen die der physikalischen Chemie und der Biochemie. Welche Prozesse haben zu einer so hohen Molekülkonzentration beigetragen, dass über lange Zeitabschnitte Reaktionen aus einfachsten chemischen Bausteinen zu komplexen Molekülen stattfinden konnten? Wie erfolgte die Verknüpfung dieser Bausteine auf der Erde – in einer Umgebung mit Wasser, das zwar als allgemeine Voraussetzung für Leben definiert wird, aber die Reaktionen extrem behindert? Sie finden heute nur mit Hilfe von Enzymen im wässrigen Milieu der Zelle statt oder im Labor in einem organischen Lösungsmittel. Organische Lösungsmittel wie Alkohole oder Äther sind für die frühe Erde nur in geringsten Konzentrationen denkbar. Aber über allem steht die sich anschließende Frage, wie es zur chemischen Speicherung der Information kommen konnte, die in jeder DNA enthalten ist und die gesamte Entwicklung der biochemischen Prozesse über einen Zeitraum von mehr als 3,8 Mrd. Jahren bei sich trägt. Ein Datenchip in jeder Zelle: Können wir ihn nicht einfach auslesen und die Anfänge identifizieren?

Die Antwort ist ein klares Nein. Nicht ohne Grund klingt in vielen Äußerungen früherer Forscher zu diesem Thema die resignierende Aussage an, dass es vermutlich nie gelingen wird, die zum Leben führenden Prozesse jemals vollständig zu erkennen, geschweige denn zu erklären.

### **Aber wie fing es überhaupt an?**

Jedes Forschungsprojekt hat eine Vorgeschichte, die eine länger, die andere kürzer. Die Geschichte der eigenen Ursprungsforschung begann Ende der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts im Westerwald bei der Bearbeitung der 20 Mio. Jahre alten Vulkanite dieser Region des Rheinischen Schiefergebirges. Im Zuge der Untersuchungen

fielen Strukturen auf, die nur mit speziellen überregionalen tektonischen Prozessen und Bruchstrukturen der Kruste erklärbar schienen, aber nicht geklärt werden konnten. Erst später, nach der Jahrtausendwende, ergab sich die Möglichkeit, die Ausbildung von Bruchstrukturen in der Nachbarregion, der Eifel, weiter zu untersuchen. Die Kartierung von tektonischen Störungszonen, die senkrecht stehend eine für Gase offene Verbindung zum Erdmantel bereitstellen, brachte eine Überraschung mit sich. Jedes Mal, wenn die Bruchzonen und Gasaustritte – überwiegend von Kohlenstoffdioxid – nachgewiesen werden konnten, waren gleichzeitig hügelbauende Waldameisen vor Ort. Die Zusammenhänge waren so augenfällig, dass nach einiger Erfahrung Vorhersagen für Standorte von Waldameisen allein aus geologischen Kenntnissen möglich wurden. Ein Unding in der Biologie! Aus den Beobachtungen entwickelte sich ein neues Forschungsgebiet, das viele Diskussionen hervorrief. Anfänglich gab es Ablehnung von beiden Seiten, der Geologie und der Ameisenforschung, die aber schließlich nach einer langen Durchhaltephase in eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit Entomologen mündete. Die Suche nach den Ursachen – warum siedeln die Vertreter der Waldameisengattung *Formica* auf gaspermeablen Störungszonen? – führte zu Überlegungen in alle Richtungen. Sind es Feuchtigkeit, Wärme, Biofilme in den Klüften oder Stoffe, die neben dem Gas mit nach oben kommen und die Ameisen oder Bakterien der möglichen Biofilme ernähren? Hilft das  $\text{CO}_2$  der Verpilzung der Eier und Larven vorzubeugen oder Feinde und Parasiten bei hohen Gaskonzentrationen, die sie selbst gut vertragen, in den Griff zu bekommen? Oder hat gar Kohlenstoffmonoxid, das in geringen Konzentrationen mit dem Kohlenstoffdioxid emporsteigt, eine Funktion? Wie wird es aus der Hämolymphe, dem Blut der Insekten,

entfernt? Bilden die Waldameisen hieraus mit einem Molekül Wasser gleich ihre chemische Waffe, die Ameisensäure?

Bei all diesen Überlegungen geriet der tiefere Bereich der Störungszonen mehr und mehr in den Fokus. Waren hier nicht alle Ausgangsstoffe vorhanden, die für die Entstehung organischer Moleküle notwendig waren? Zusätzlich bestehen dort Druck- und Temperaturverhältnisse, die bei Prozessen der technischen Chemie eingestellt werden, wie bei der Fischer-Tropsch-Synthese zu Bildung von Kohlenwasserstoffverbindungen (siehe Abschn. 3.1). Hiermit lässt sich zum Beispiel synthetisches Benzin herstellen. Außerdem gibt es genügend Metallverbindungen, die als Katalysator dienen können. War dies alles möglicherweise der Schlüssel zu der Vorliebe der Ameisen, ihre Nester auf den Störungen zu bauen?

Und plötzlich hat es „klick“ gemacht! Das waren doch ideale Bedingungen für die Anfangsphase des Lebens: ein geschützter Raum, über Millionen Jahre verfügbar, mit allen notwendigen Ausgangsstoffen und unendlich vielen kleinen Reaktionsräumen, in denen jeweils unterschiedliche Druck- und Temperaturbedingungen sowie pH-Werte vorlagen und heute noch vorliegen.

Die Idee, ein Modell über die Entstehung des Lebens zu entwickeln, war geboren. Von da an kamen die abendlichen Runden mit Oliver Locker-Grütjen und den Kollegen ins Spiel, die über mehr als zehn Jahre stattfanden. Es trafen sich Vertreter aus der Chemie, Biologie, Physik, physikalischen Chemie, Bioinformatik, Mikrobiologie und meiner Fachrichtung, der Geologie. Es war die entspannte Atmosphäre – einer hat gekocht (meistens Hans-Curt Flemming), es gab Wein oder Bier –, die half, sich endlich einmal in Ruhe über die Frage auszutauschen, die alle am meisten beschäftigte. Und dann die Ernüchterung: Wir wussten eigentlich alle nichts von dem, was diese konkrete Frage betraf. Sicher war das landläufige Wissen

um die Anfänge dieser Diskussion bekannt, die alten Vorstellungen und ersten Versuche. Auch neuere Entwicklungen, die in den Medien immer wieder verbreitet wurden, waren präsent. Aber die eigentlichen Kernfragen der Zellbildung, der Informationsspeicherung und Enzyymbildung, all das war, wie auch bei den Kollegen weltweit, ein absolutes Dunkelfeld. Folglich fingen wir an zu recherchieren, hielten uns gegenseitig Vorträge über die neu gelernten Inhalte, luden Kollegen, die schon einen Namen in diesem Forschungszweig hatten, zu Kolloquien ein und ersannen sogar erste Experimente, die etwas mit einem Störungsumfeld der kontinentalen Kruste zu tun haben sollten.

Mehr und mehr drängte sich aber der Verdacht auf, dass das Feld einem undurchdringlichen Nebel glich, das weder Anfang noch Ende erkennen ließ. Das Vorwärtsskommen in unseren Überlegungen verlangsamte sich zusehends und schien sich einer Grenze zu nähern. Mit einer Nebenbemerkung versuchte ich die Bedeutung von  $\text{CO}_2$  für die Entwicklung von Molekülen wie Aminosäuren oder organischen Basen zu erfragen. Ich erinnerte mich an einen Absatz im Buch „Chemische Evolution“ von Horst Rauchfuß [6]. Wir hatten es zuvor sogar gewagt, ihn in seinem hohen Alter nach Essen zu einem Vortrag einzuladen, was er gerne annahm. In dem Absatz seines Buches ging es um Reaktionen im Überschuss von  $\text{CO}_2$ , das günstig für die Bildung organischer Moleküle sein sollte. Da sich keiner an diese Passage erinnern konnte, recherchierte ich am nächsten Tag hierzu im Internet. Bereits die ersten Links zur Suchanfrage hatten in der Unterzeile Angaben, die mich wie einen Blitz trafen und alles veränderten. Ab einer Krustentiefe von ca. 750 m liegt  $\text{CO}_2$  in der überkritischen Phase vor, wenn die Temperatur über 31 °C liegt.

Dieses an sich selbstverständliche Faktum war in dem großen Nebel, in dem wir herumstocherten, einfach

untergegangen. Ich meldete meine neue Entdeckung sofort an Christian Mayer weiter. Als Physikochemiker war ihm sofort klar, dass wir damit ein Werkzeug an der Hand hatten, das eine ganz neue Welt eröffnete, ein Lösungsmittel, mit dem wir Reaktionen durchführen konnten, die an der Erdoberfläche unmöglich waren.

Es folgten weitere Zufälle, die zu dem Punkt führten, an dem wir heute stehen. Einer davon war die Einführung einer neuen Software für die Verwaltung der Universität. Sie hatte zur Folge, dass die finanzielle Situation aller Fakultäten mehr als zwei Jahre in einer Art Urnebel verborgen schien. In dieser Zeit reifte die Überlegung für die Anschaffung einer Hochdruckanlage. Da die klassischen Geldgeber beharrlich die Forschungsunterstützung verweigerten (Erfahrungen hierzu ließen sich in einem eigenen Bühnenstück verarbeiten), schaffte ich aus vermeintlichen Eigenreserven die entsprechende Anlage an. Es war die bedeutendste Maßnahme in meiner ganzen Forscherzeit. Sie brachte mit jedem durchgeführten Versuch Ergebnisse, die etwas völlig Neues darstellten und einen großen Schritt in Richtung des Verständnisses der Prozesse zu Beginn des Lebens bedeuteten. Als sich der Finanznebel lichtete, hatte sich genau der sechsstellige Betrag, den die Anlage gekostet hatte, als Schulden auf meinem Haushaltskonto angesammelt. Ohne Nebel hätte ich es nicht gewagt, so hohe Schulden zu machen, die Versuche wären nicht erfolgt.

Ein weiterer Umstand war sehr glücklich. Während sich die Gruppe aus Zeitgründen inzwischen auf wenige Teilnehmer reduziert hatte, wurde ein neuer Kollege der analytischen Chemie, Oliver J. Schmitz, berufen. Sein neues, hochmodernes Labor und die sofortige Bereitschaft, an dem Projekt mitzuarbeiten, brachten erst die Möglichkeit, die geringen Molekülkonzentrationen aus unseren von Maria Davila-Garvin durchgeführten Hochdruckexperimenten zu analysieren. Die von Christian Mayer



ersonnene Versuchsreihe der zyklischen Vesikelbildung führte zu einer besonderen analytischen Herausforderung, der sich Amela Bronja aus der Analytik schließlich mit Erfolg stellte.

Es gab weiterhin eine Vielzahl von kleinen und großen glücklichen Zufällen, die zu Kontakten und Fortschritten führten, ohne die viele Aspekte im Ansatz stecken geblieben wären. Hierzu gehört die Verbindung in die Geowissenschaften nach Heidelberg zu den Arbeitsgemeinschaften von Heinfried Schöler und Frank Keppler, die maßgeblich an den Untersuchungen der Flüssigkeits-einschlüsse hydrothermaler Quarze beteiligt waren (mit den Mitarbeitern Ines Mulder, Tobias Sattler und Markus Greule sowie zusätzlich Mark Schumann aus meiner Arbeitsgruppe), sowie zu Jonathan Williams vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz, über den sich ein ganzer Zweig wichtiger Kontakte in die USA entwickelte. Gerald Dyker aus Bochum gab als organischer Chemiker etliche Anregungen für weitere Experimente. Nicht zuletzt muss ich das Mensaprinzip erwähnen, das den unmittelbaren Austausch und die „Weiterbildung“ in einem mir relativ fremden Fach erst ermöglicht hat. Christian Mayer, der Physikochemiker, Peter Bayer, der Biochemiker, Daniel Hoffmann, der Bioinformatiker, und Oliver J. Schmitz, der Analytiker haben alle gelitten unter meinen Fragen und zum Teil überschießenden Ideen. Aber es hat etwas gebracht: Die Mensatreffen mit anschließendem Kaffee waren die effektivste Form des wissenschaftlichen Austausches.

Wenn man sich wie wir, die Essener Gruppe, völlig neu mit der Thematik „Ursprung des Lebens“ beschäftigt, stellen sich als Erstes grundlegende Fragen zum Stand der Wissenschaft. Was ist bisher bekannt, welche Überlegungen haben die früheren Forscher gehabt und welche

Versuche gab es, die einen Hinweis auf den Anfang geben, aus dem sich das Leben entwickelt haben könnte?

Es gibt eine Reihe von Naturwissenschaftlern, die sich in den letzten einhundert Jahren intensiv mit der Frage der Lebensentstehung beschäftigt haben. Es begann mit einem vorsichtigen Herantasten an die komplexe Thematik, die zu Anfang nur theoretisch behandelt werden konnte. Erst Mitte des letzten Jahrhunderts begannen Experimente, die erste Hinweise auf die Möglichkeit eines biochemisch begründeten Starts des Lebens gaben. Der Erfolg der frühen Forschung musste erwartungsgemäß sehr begrenzt sein. Zu wenig war über die Rahmenbedingungen wie die planetare und geologische Entwicklung der Erde oder den Einfluss astronomischer Größen bekannt. Die in den späteren Kapiteln aufgeführte Zusammenstellung der älteren Arbeiten gibt einen Einblick, wie mit neuen Entdeckungen kontinuierlich neue Vorstellungen entwickelt wurden. Vorab wird in den Kap. 2 bis 4 der heutige Stand des Wissens zusammengefasst, der im Schwerpunkt die planetaren und physikochemischen Voraussetzungen betrifft. Allein hieraus ergibt sich eine Vielzahl von notwendigen Randbedingungen für die Entwicklung des Lebens, wie wir es kennen. Von den Modellvorstellungen, die in den letzten Jahrzehnten einer breiteren Öffentlichkeit bekannt gemacht wurden, werden die Wesentlichen vorgestellt. Es sind die Erklärungsansätze, die eine breitere Basis bieten und mehr als nur einen Ausschnitt einer interessanten Reaktionsfolge beinhalten. Die Betrachtung erfolgt im Kontext der neueren planetaren Kenntnisse. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die älteren Bearbeiter zwangsläufig von dem damaligen Stand des Wissens ausgehen mussten, was die Aussagen ihrer Modelle entsprechend einschränkt.

Die Forschung zum Ursprung des Lebens hat gerade in den letzten Jahren weltweit einen verstärkten Impuls

erhalten. Neue Erkenntnisse aus der Analyse von Meteoriten, des Ozeanraums oder der kontinentalen Kruste haben zu neuen Modellvorstellungen geführt, die erstmals mit belastbaren Rahmenbedingungen Laborversuche ermöglichen, mit denen chemische Reaktionen unter realistischen Verhältnissen durchgeführt werden können. Weiterhin sind Dokumente aus der Frühzeit der Erde entdeckt worden, die die Anfänge der organischen Chemie zeigen. Aus allen zurzeit vorliegenden Daten lässt sich im Nebel der Vergangenheit ein erster unscharfer Umriss erkennen, der eins deutlich macht: Das Rätsel über die Entstehung des Lebens ist lösbar. Es zeichnet sich aber bereits jetzt ab, dass es eines physikalisch-chemischen Prozesses mit einem hohen Zeitaufwand bedurfte, um die Zelle zu entwickeln, die als letzter gemeinsame Vorfahre allen Lebens auf der Erde gilt.

In den abendlichen Diskussionsrunden unserer „Origin“-Gruppe gab es einen Aspekt, der latent im Hintergrund mitschwang: Wenn es gelingt, eine Vorstellung über die Anfangsphase des Lebens zu entwickeln – wird das bedeuten, dass wir dieses Modell auch auf andere Planeten im Universum übertragen können? Oder noch verrückter: Kann daraus geschlossen werden, dass es weitere Planeten im Weltall gibt, die irgendeine Form von Leben, vielleicht höheres, aufweisen? Bald wurde klar: Es ist nicht ausgeschlossen. Aber ganz so häufig wird die Chance zur Entwicklung eines intelligenten Wesens an anderer Stelle nicht sein.

## Literatur

1. Bojowald M (2009) Der Ur-Sprung des Alls. Spektrum der Wiss. 5:26–32
2. Bojowald M (2009) Zurück vor den Urknall. Die ganze Geschichte des Universums. Fischer, Frankfurt a. M.

3. Feinberg G, Shapiro R (1980) Life beyond earth: the intelligent earthling's guide to life in the universe. William Morrow, New York
4. Joyce GF (1995) The RNA world: life before DNA and protein. In: Zuckerman B, Hart MH (Hrsg) Extraterrestrials. Where are they? Cambridge University Press, Cambridge, S 139–151
5. Kauffman SA (1996) At home in the universe: the search for laws of self-organization and complexity. Penguin, London
6. Rauchfuß H (2005) Chemische Evolution und der Ursprung des Lebens. Springer, Heidelberg



# 2

## Globale Voraussetzungen

### Inhaltsverzeichnis

2.1	Erste Voraussetzung: Die Planeten und eine Sonne mit System . . . . .	21
2.2	Zweite Voraussetzung: Die Erde – eine Materialsammlung für den Start . . . .	24
2.3	Dritte Voraussetzung: Das Wasser. . . . .	30
2.4	Vierte Voraussetzung: Eine dauerhafte Atmosphäre . .	32
2.5	Wie ging es weiter? . . . . .	36
	Literatur . . . . .	44

### 2.1 Erste Voraussetzung: Die Planeten und eine Sonne mit System

Wo sollten wir anfangen? Die Rahmenfaktoren, die nicht direkt etwas mit dem Leben zu tun haben, schienen besser bekannt als der Start der organischen Chemie. Also stürzten wir uns auf die Zeit vor dem Beginn des Lebens,

auf alles, was mit den planetaren Voraussetzungen zu tun hatte. Sicher hätten wir auch gleich die Anfangsphase des Universums mit einbeziehen können; das erschien uns allerdings für die eigentliche Entwicklung des Lebens auf der Erde etwas weit ausgeholt. Es ist darüber hinaus ein Punkt, der noch weiter im Dunklen liegt als die Entstehung des Lebens selbst. Für den Start von allem wird es immer nur Hypothesen geben, da Experimente, die einen Nachweis erbringen könnten, unmöglich sind. Die eigentlichen Prozesse der Lebensentstehung können unabhängig davon als physikochemische und biochemische Vorgänge gesehen werden. Das, was vorausgesetzt werden muss, ist ab einem bestimmten Zeitpunkt die Existenz von Materie, die die Bildung von Galaxien und Sonnensystemen ermöglichte. Bei der weiteren Betrachtung liegt unser Sonnensystem zwangsläufig im Fokus. Es ist mit dem Planeten Erde das bislang einzige Beispiel, das wir für die Entwicklung einer biologischen Zelle aus primär anorganischer Materie zur Verfügung haben. Wir folgern aus unseren Kenntnissen, dass als Voraussetzung für das Leben grundsätzlich ein Gesteinsplanet möglichst mit einem begleitenden Mond innerhalb eines Sonnensystems notwendig ist. Gleichzeitig ist die Position dieses Systems innerhalb der Galaxie von Bedeutung. Im Zentrum jeder Galaxie finden über ihre gesamte Lebensdauer hinweg Supernovaexplosionen oder Neutronensternkollisionen statt. Hierbei entstehen energiereiche Gammablitzes, die eine Gefahr für jedes Leben darstellen. Die Gefährdung nimmt nach außen in Richtung der Spiralarme ab, dorthin, wo sich auch unser Sonnensystem entwickelt hat.

Die Sonne selbst als Zentrum eines Planetensystems muss eine bestimmte Größe aufweisen. Hiervon hängen unmittelbar ihre Lebensdauer, die Leuchtkraft sowie die Stärke der Anziehungskräfte auf die Planeten ab. Ein Planet, der Chancen für die Entwicklung komplexer

organischer Moleküle mitbringen soll, muss in der habitablen, also der bewohnbaren Zone des Sonnensystems liegen und bestimmte Eigenschaften aufweisen. Als bewohnbare Zone definieren Astronomen einen relativ engen Bereich um die Sonne, dessen Abstand von ihr so groß ist, dass Wasser auf den existierenden Planeten in flüssiger Form vorliegen kann. Flüssiges Wasser ist die unbedingte Voraussetzung für Leben, wie wir es kennen. Ein zu großer Abstand zum Zentralgestirn hat Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes zur Folge. Mit einer größeren Nähe wird eine sich bildende Atmosphäre inklusive Wasserdampf durch die hohen Temperaturen und/oder den Strahlungsdruck (Sonnenwind) vernichtet. Ein Schlagwort beschreibt die Situation für die Erde sehr treffend: Sie befindet sich genau am Tripelpunkt des Wassers. Das heißt, es gibt sowohl Eis als auch Wasser und Wasserdampf, also festes, flüssiges und gasförmiges Wasser. Allerdings stimmt es nur eingeschränkt. Die Erde liegt eigentlich so weit von der Sonne entfernt, dass sie von Beginn an als Eisplanet ihre Bahnen hätte ziehen müssen. Aber nach einer Übergangszeit kam ein glücklicher Umstand zum Tragen: die Ausbildung einer Gashülle, die bis heute mit ihren Eigenschaften der Wärmerückstrahlung verhindert hat, dass sich die Oberflächentemperaturen dauerhaft unter null bewegen.

Für den Wärmehaushalt günstig ist darüber hinaus eine Rotation des Planeten und ein begleitender Mond, der die Rotation stabilisiert. Durch eine Rotation werden extreme Klimaverhältnisse ausgeglichen, die bei einem Stillstand zwischen sonnenzugewandter und sonnenabgewandter Seite entstehen. Die Kopplung der Rotation an einen Mond verhindert, dass extreme Neigungsschwankungen der Rotationsachse auftreten, was starke Auswirkungen auf das Klima hätte. Weiterhin sind neben der Existenz von Wasser Rohstoffe erforderlich, die

zu einer Kohlenstoffchemie führen. Die Möglichkeiten der Entwicklung alternativer Lebensformen mit anderen Komponenten als Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, zum Beispiel auf Siliziumbasis, werden als äußerst gering eingeschätzt. Es liegen aber lediglich Erfahrungen für eine Biologie mit Kohlenstoff vor, die durch unsere begrenzte, erdbezogene Sicht begründet ist. Weiterhin ist für die Entwicklung des Lebens frühzeitig ein Magnetfeld erforderlich, das den ständig von der Sonne ausgesendeten Partikelstrom abhält. Die Bedeutung des letzten Punktes werde ich noch einmal in einer eigenständigen Betrachtung vertiefen.

## **2.2 Zweite Voraussetzung: Die Erde – eine Materialsammlung für den Start**

Das Leben auf der Erde ist das sichtbare Zeichen, dass alle notwendigen Rahmenbedingungen für sein Entstehen vorhanden waren. Nach Bildung des Zentralgestirns unseres Sonnensystems war ausreichend Staubmaterial in seinem Umfeld vorhanden, aus dem durch fortgesetzte Kollisionen größere Objekte entstehen konnten. Die Partikel verschmolzen zu kleinen und großen Meteoriten, Asteroiden und Planetesimalen, den kilometergroßen Asteroiden, aus denen schließlich immer größere Objekte wurden. Am Ende standen die bis heute verbliebenen Gesteinsplaneten. Die Bildung der ersten Planetesimalen startete vor 4,567 bis 4,568 Mrd. Jahren [1]; die durch gravitative Kräfte gesteuerte Ansammlung zu Planeten, in der Astronomie als Akkretion bezeichnet, fand in den nachfolgenden 30 bis 100 Mio. Jahren statt. Von Bedeutung ist der Zeitpunkt der Mondbildung. Er liegt vor mehr als 4,5 Mrd. Jahren, nach neuesten Berechnungen in einem Zeitfenster



von 20 Mio. Jahren nach der Entstehung der Erde. Über seine Bildungsbedingungen gibt es eine intensive Diskussion, die durch alternative Modelle neuen Aufwind erfahren hat. Die größte Zustimmung hat ein Modell, das als Ursache die Kollision der jungen Erde mit einem marsgroßen Planeten, genannt „Theia“, sieht [2]. Hierbei sollen Trümmer von beiden Planeten ins All geschleudert worden sein, die sich anschließend zum Erdtrabanten vereinten. Eine Variante hierzu bringt mehr Energie mit ins Spiel, die bislang ungeklärte Probleme lösen könnte. Einerseits sind die Isotopenverhältnisse der Gesteine von Mond und Erde nahezu identisch, andererseits scheint es bei der Bildung des Mondes einen Verlust an Natrium und Kalium gegeben zu haben. Der Geophysiker Simon Lock von der Harvard University hat hierzu eine viel beachtete Hypothese aufgestellt. Seinen Vorstellungen nach soll die Kollision zwischen Erde und Theia so heftig gewesen sein, dass das gesamte Material oder zumindest ein Großteil beider Planeten verdampfte und anschließend wieder zu fester Materie kondensierte. Aus dieser entstand seinen Berechnungen nach das Tandem Erde-Mond. Die Hypothese könnte sowohl die gleiche Isotopenverteilung verschiedener Elemente auf Erde und Mond als auch den Verlust an Kalium und Natrium im Mondgestein erklären helfen [3, 4].

Eine statistische Auswertung der Einschlagskrater auf dem Mond zeigt, dass es eine Phase zwischen 4,1 und 3,8 Mrd. Jahren gegeben haben muss, in der verstärkt Asteoriden auf den Planeten und dem Mond einschlugen („heavy bombardement“) [5]. Mit jeder Kollision der Fragmente wurde die Bewegungsenergie überwiegend in Wärme umgewandelt. Das bedeutet, dass das Anwachsen zu einem Planeten wie der Erde nur in Verbindung mit einer starken Aufheizung möglich war. Die Temperatur erreichte so hohe Werte, dass Teile der

Gesteinsmassen glutflüssig wurden, allerdings nicht der gesamte Planet. Nach älteren Berechnungen dauerte es ca. eine Milliarde Jahre, bis durch Zerfall radioaktiver Isotope der Temperaturanstieg so hoch war, dass bei den herrschenden Druckverhältnissen in Tiefen bis 1000 km Eisen zu schmelzen begann. Abschätzungen über die Temperaturentwicklung zeigen, dass erst hierdurch eine Materialtrennung in einen eisenreichen Kern und den Mantel aus Gesteinsmaterial möglich war. Diese Situation beschreibt heute noch die Verteilung der Materialien im Erdinneren. Allerdings wurden die Berechnungen wieder in Frage gestellt, als sich die Vorstellungen über die Entstehung des Mondes konkretisierten. Sollte nach Bildung der Erde eine Kollision mit einem weiteren Planeten stattgefunden haben, war dies eine deutliche Zäsur in der Abkühlungsgeschichte des jungen Planeten. Ob eine schlagartige Temperaturerhöhung, die mit einer derartigen Kollision zu erwarten ist, zur teilweisen oder vollständigen Aufschmelzung der Erde führte, ist Stand der Diskussion (siehe einleitenden Absatz zu Abschn. 2.2). Von größter Bedeutung für die Entstehung des Lebens ist hierbei die Bildung des Erdkerns. Seine Entstehung aus einer Mischung aus flüssigem Eisen und Nickel legte den Grundstock für die Entwicklung des Erdmagnetfeldes [6].

Gleich mit der ersten Abkühlung, noch vor der Bildung des Mondes, muss es eine erste Krustenbildung aus einem Hochtemperaturbasalt gegeben haben, der besonders reich an Magnesium und arm an Silizium und Aluminium war. Dieser Basalttyp wird als Komatiit bezeichnet. Die erste Kruste wurde, sofern sich das Kollisionsmodell bestätigt, durch den Zusammenprall mit dem marsähnlichen Planeten vernichtet. Mit erneuter Abkühlung bildete sich eine Kruste, die wieder aus dem Hochtemperaturbasalt Komatiit bestand. Von ihm existieren heute nur noch wenige Relikte auf der Erdoberfläche. Über eine Atmosphäre vor

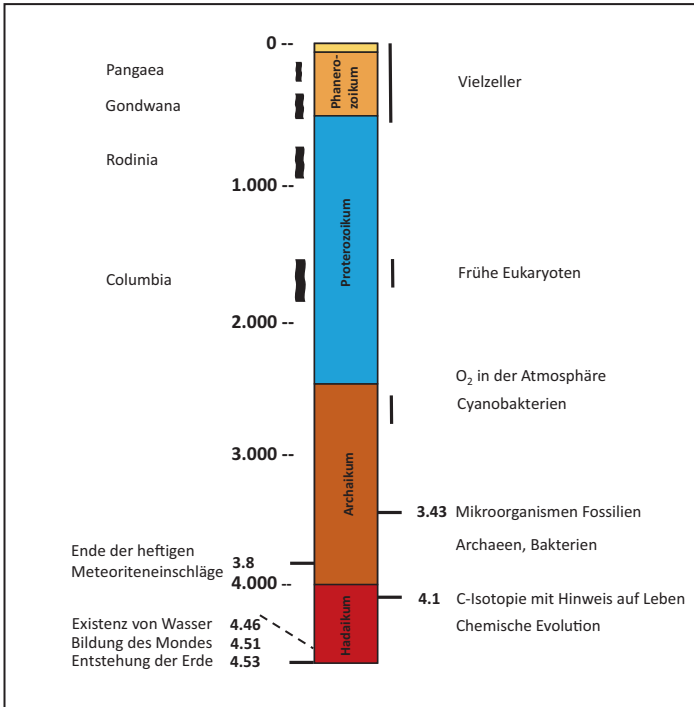
und unmittelbar nach der Bildung des Mondes ist nichts bekannt. Quellen von gasförmigen Stoffen waren genug vorhanden, wobei ein Teil der Gase aus dem Erdinneren stammte. Sie gelangten durch Spalten und Vulkaneruptionen an die Oberfläche. Ein anderer Teil kam mit nachfolgenden Meteoriten und Kometen aus einem Gürtel, der einen zu großen Abstand zur Sonne hatte, als dass die flüchtigen Komponenten verdampfen konnten. Die Anziehungskraft der Erde war zu dieser Zeit eigentlich ausreichend groß, sodass Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Stickstoff nicht ins Weltall entweichen konnten. Trotzdem ist die längere Existenz einer Atmosphäre zu hinterfragen, da sich vermutlich noch kein ausreichend starkes Magnetfeld in der Erde ausgebildet hatte, das Schutz vor dem Sonnenwind hätte bieten können.

Das planetare Magnetfeld ist die Ursache dafür, dass der ständig abgegebene Partikelstrom von der Sonne (Sonnenwind) nicht die Erdoberfläche erreicht. Heute bekommen nur nach besonders starken Eruptionen auf der Sonnenoberfläche geladene Teilchen in den Polregionen Kontakt zur Atmosphäre, wo sie Partikel anregen, die die faszinierenden Polarlichter hervorrufen. Ein schwächeres Magnetfeld, wie es in der Frühphase der Erdentwicklung vorlag, verschob die Magnetopause dichter an die Erde heran. Die Magnetopause ist die Grenze, an der der dynamische Druck des Sonnenwinds gleich dem dynamischen Druck des Magnetfeldes ist, also die Barriere, die den Plasmastrom nicht durchlässt, sondern zur Seite ablenkt. Starke Eruptionen auf der Sonnenoberfläche können aber im Fall einer erdnahen Magnetopause dazu führen, dass der Plasmastrom die Grenze durchbricht und die Erdoberfläche erreicht. So muss für die junge Atmosphäre davon ausgegangen werden, dass Teile von ihr immer wieder durch solche Ereignisse erodiert wurden. Die Sonne sendete in der Anfangsphase einen im Vergleich zur heutigen

Zeit hundertfach stärkeren Sonnenwind aus. Dieser Partikelstrom traf zu Beginn ohne Magnetfeld ungeschützt auf die sich bildende Atmosphäre, die ihm nicht standhalten konnte. Sie wurde mitgerissen, so wie diejenige des Mars, der heute keine nennenswerte Atmosphäre mehr besitzt. Die Marsatmosphäre beträgt weniger als ein Hundertstel des Atmosphärendrucks der Erdatmosphäre.

Einfache organische Moleküle konnten sich von Beginn an in geringen Konzentrationen auf Landmassen oberhalb der Wasseroberfläche entwickeln. Dies geschah durch Kontakt von Oberflächenwässern mit heißen Laven und Gasen oder durch Reaktionen, die aufgrund der energiereichen Strahlung der Sonne stattfanden. Weiterhin gab es einen geringen Eintrag organischer Moleküle aus dem Weltall. Alle ungeschützt dem Sonnenwind ausgesetzten organischen Moleküle wurden nach kurzer Zeit zerstört. Gleiche Wirkung hatte die sehr starke ultraviolette Strahlung, deren Strahlungsanteil zu Beginn der Sonnenaktivität deutlich höher war als heute. Verstärkend kam hinzu, dass es noch keine schützende Atmosphäre mit einem Ozonschild gab, der erst nach dem Beginn der biologischen Sauerstoffproduktion vor mehr als 2,4 Mrd. Jahren in den oberen Schichten der Gashülle in ausreichender Mächtigkeit gebildet werden konnte (Abb. 2.1:  $O_2$  in der Atmosphäre).

Im Nordwesten Australiens gibt es mit die ältesten Gesteine, die auf der Erdoberfläche zu finden sind. Sedimentgesteine führen neben Quarz häufig sehr stabile Zirkone, die wiederum magnetische Einschlüsse besitzen können. Aus ihnen lassen sich Hinweise auf ein Magnetfeld erkennen, das zur Zeit des Einschlusses gerade geherrscht hat. Untersuchungen an derartigen Mineral Einschlüssen aus den Jack Hills in Westaustralien deuten darauf hin, dass bereits vor 4 Mrd. Jahren ein Magnetfeld existiert haben kann, allerdings mit einer Stärke von nur



**Abb. 2.1** Die Zeitepochen der Erde und bedeutende Ereignisse sowie Auftreten von Lebensformen im Zeitstrahl. Oberster Zeitabschnitt (gelb)=Känozoikum. Schwarze gewellte Balken entsprechen Zeiten der Großkontinente Columbia, Rodinia, Gondwana und Pangaea

etwa 12 % des heutigen Feldes [7] Die ermittelten Werte sind aber durch temperaturbedingte Einflüsse während einer nachfolgenden Überprägung der Gesteine mit hohen Temperaturen und Drucken (Gesteinsmetamorphose) mit größeren Unsicherheiten behaftet. Aus Mineralen jüngerer Gesteine von vor 3,4 Mrd. Jahren konnten Feldstärken gemessen werden, die mindestens 50 % des heutigen Erdmagnetfeldes entsprechen [8]. Dies zeigt trotz größerer Unsicherheiten in den gewonnenen Daten, dass

der Aufbau des Magnetfeldes eines größeren Zeitraums bedurfte. Durch seine anfänglich geringe Stärke gab es auf der Erdoberfläche erhebliche Probleme bei der Entwicklung organischer Moleküle, ihrem Erhalt und dem Ausbilden von Reaktionsketten, die zu komplexeren Molekülen führen konnten.

### **Die Besonderheit der Marsatmosphäre**

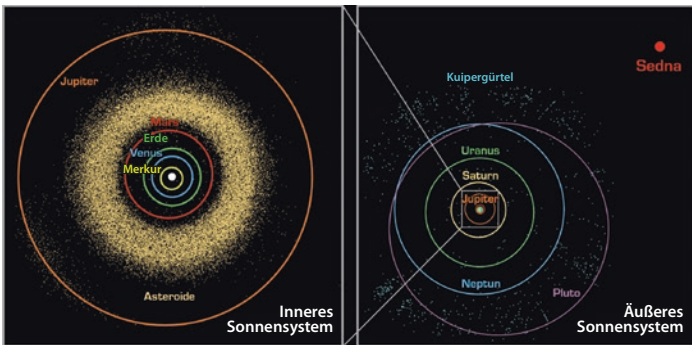
Die fehlende Atmosphäre auf dem Mars soll mit einer anderen Entwicklung des Planetenkerns zusammenhängen. Dieser war zu Beginn ebenfalls flüssig, wurde aber sehr schnell fest. Während der flüssigen Phase existierte entsprechend ein Magnetfeld, das den Sonnenwind abschirmte. In dieser Zeit gab es fließendes Wasser und eine Atmosphäre. Nach Kristallisation der Eisenschmelze im Kern des Mars brach sein Magnetfeld zusammen. Es folgte der Angriff des Sonnenwindes, der die Atmosphäre und das Wasser, das verdampfte, mit sich riss [9, 10]. Es gibt Überlegungen, dass der junge Mars ebenfalls Bedingungen für die Entstehung des Lebens bereitgestellt hat, eine Entwicklung zu niederem Leben aber durch die beschriebenen Verhältnisse verhindert wurde.

## **2.3 Dritte Voraussetzung: Das Wasser**

„Wie kam das Wasser auf die Erde?“ Diese Frage stand bei der Diskussion um die Entstehung des Lebens relativ früh im Raum: Die Astronomen jubeln, wenn sie auf anderen Planeten oder Monden Wasser, wenn auch nur in geringsten Spuren, identifizieren können. Bei uns scheint es ein besonderer Glücksfall gewesen zu sein, dass wir gleich so viel abbekommen haben, dass sogar zwei Drittel unseres Planeten mit Wasser bedeckt sind. Wasser ist doch nach Meinung aller die Grundlage des Lebens. Aber wo kam es nun her? Die Prozesse, die zur Entwicklung der Planeten führten, waren mit derart hohen Temperaturen

verbunden, dass die Bildung von Wasser in der Anfangsphase ausgeschlossen war. Also muss es von außen gekommen sein, wie eigentlich alles andere auch – nur etwas später, als die Temperaturen nicht mehr so außerordentlich hoch waren. Als beste Kandidaten für einen Ursprung wurden die Kometen mit ihren hohen Anteilen aus  $\text{H}_2\text{O}$ - und  $\text{CO}_2$ -Eis diskutiert. Die Analyse ihrer Isotopenzusammensetzung brachte allerdings Ernüchterung. Fast alle untersuchten Wassermoleküle der Kometen unterscheiden sich deutlich von der Isotopenzusammensetzung des irdischen Wassers. Lediglich ein kleiner Beitrag kann von ihnen abgeleitet werden. Neben der Überlegung, dass möglicherweise noch nicht die richtigen Kometen mit dem entsprechenden Isotopenverhältnis gefunden wurden, konnten aber auch andere Überbringer des Wassers identifiziert werden.

Modellierungen der Bahnbewegungen aller Planeten seit ihrer Entstehung ergaben, dass Abweichungen der Bahnen der großen Gasplaneten Jupiter und Saturn in der Frühphase des Sonnensystems Turbulenzen im inneren und äußeren Asteroidengürtel hervorgerufen haben müssen. Während die sonnennahen Asteroiden nur einen geringen Wasseranteil aufweisen, treten im äußeren Gürtel Planetesimale mit bis zu 10 % Wasser auf (Abb. 2.2). Durch die von den Gasplaneten erzeugten Bahnstörungen der Asteroiden innerhalb der Gürtel wurde ein Teil von ihnen auf Kollisionskurs mit der Erde abgelenkt. Die Berechnungen zeigten, dass ein Beitrag von 1–2 % der Erdmasse von diesem äußeren Gürtel ausreicht, um die heute vorhandene Wassermenge auf der Erde zu erklären [11]. Die Hauptmasse des Wassers erreichte die Erde nach diesen Vorstellungen erst in der Spätphase des Bombardements, dem alle Planeten ausgesetzt waren. Große Mengen davon gelangten in den Erdmantel, aus dem auch heute noch geringe Anteile während vulkanischer Eruptionen an die Atmosphäre abgegeben werden.



**Abb. 2.2** Inneres und äußeres Sonnensystem mit Planeten, Asteroiden- und Kuiper-gürtel. (© Courtesy NASA/JPL-Caltech [12])

## 2.4 Vierte Voraussetzung: Eine dauerhafte Atmosphäre

Wir haben somit eine Vorstellung davon, wie der Planet gebildet wurde und die Gesteinssphäre, die Lithosphäre, ausgebildet hat. Weiterhin gibt es plausible Erklärungen dafür, wie das Wasser hinzukam, das die Hydrosphäre bildete. Jetzt fehlt noch die dritte Größe, die Atmosphäre. Alle drei bilden eine Schnittmenge, die etwas mit der Lebensentwicklung zu tun hat. Die Ausbildung einer beständigen Atmosphäre auf einem Planeten ist an drei wesentliche Voraussetzungen geknüpft. Erstens müssen Substanzen vorhanden sein, die unter den Druck- und Temperaturbedingungen der Planetenoberfläche gasförmig sind. Weiterhin muss die Masse des Planeten ausreichend groß sein, damit die Schwerkraft die Gase vor der Flucht ins Weltall zurückhält und schließlich muss sich ein Magnetfeld entwickeln können, das den Partikelstrahl des Zentralgestirns (Sonnenwind) von der Oberfläche fernhält. Die Erdatmosphäre hat heute eine Zusammensetzung, die maßgeblich vom Einfluss der



Photosynthese treibenden Organismen geprägt ist. Das Auftreten von Sauerstoff in der Atmosphäre ist für die Zeit nach 2,4 Mrd. Jahren vor heute dokumentiert. Hiermit haben wir eine Besonderheit, die von keinem anderen Gesteinsplaneten bekannt ist. Die eigentliche Startphase der Erdatmosphäre ist heute nicht mehr erkennbar, da sie vom Sonnenwind vernichtet wurde. Aber es lassen sich zum Teil die Lieferanten der Gase identifizieren, die, wie im Fall des Wassers, ebenfalls aus den Asteroidengürteln stammen. So gehören sie zur späten Phase der Akkretion, die vor mehr als 3,8 Mrd. Jahren endete. Aber auch die Protoerde hatte genügend Rohstoffe, aus denen Gase wie Wasserstoff, Ammoniak, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid gebildet werden konnten. Sie lagen zum Teil gelöst im geschmolzenen Gestein im Erdinnern vor und wurden langsam durch vulkanische Eruptionen und Austritten an Bruchzonen der jungen Kruste an die Atmosphäre abgegeben. Über die Mengenverhältnisse der einzelnen Gase in einer ersten stabilen Atmosphäre lässt sich nur spekulieren. Mit Sicherheit war Wasserdampf vorhanden, der einen Großteil des Gases ausmachte. Die Größenordnung sowie die Verhältnisse von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) zu Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) sowie Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) zu Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) sind unklar. Neben Methan, Wasserstoff und Schwefelverbindungen ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$  und Schwefelsäure [ $\text{H}_2\text{SO}_4$ ] als Aerosol) waren Edelgase und Spuren weiterer Gase vorhanden. Je nachdem, was in den Verhältnissen  $\text{CO}_2/\text{CO}$  und  $\text{N}_2/\text{NH}_3$  überwog, war die Atmosphäre entweder schwach oder eher stark reduzierend. Stark reduzierend bedeutet hierbei, dass chemische Reaktionen begünstigt mit der Aufnahme von Elektronen ablaufen, und zwar bei Reaktionspartnern, die diese Elektronen bei schwach reduzierenden Verhältnissen nicht freigeben würden. Dies kann entscheidend für Zwischenschritte bei der Bildung komplexer organischer Moleküle sein.

Einen Überblick über den Stand der Diskussion geben Lammer et al. [10].

Die Konzentration des Kohlenstoffdioxids ( $\text{CO}_2$ ) in der frühen Atmosphäre ist nicht sicher bekannt. Es gibt Abschätzungen, die weit auseinanderliegen und bis über den Gehalt des heutigen Sauerstoffanteils hinausreichen. Gemeinsam ist allen Betrachtungen, dass zu Beginn der Wert weit über dem der heutigen Konzentration angenommen wird. Eine ungefähre Größe hierzu liefert die Abschätzung des Volumens der sedimentär gebildeten Kalksteinvorkommen der Erde.

### **Was haben Kalksteine mit der Atmosphäre zu tun?**

Eine Menge! Fast von Beginn der Atmosphärenentwicklung an startete eine sehr wirksame chemische Reaktionskette, die eine Verringerung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in dem Gasgemisch zur Folge hatte: die Reaktion von Kohlenstoffdioxid mit Kalziumionen aus dem Gestein der Erdkruste. Die Erdkruste enthält 4 % Kalzium. Es ist ein Hauptelement in der Zusammensetzung magmatischer Gesteine und ist zusammen mit Sauerstoff, Silizium, Aluminium und anderen Elementen im Kristallgitter gesteinsbildender Minerale eingebaut. Hierzu gehören Feldspäte oder Pyroxene. Die hellen Partien auf dem Mond sind zum Beispiel aus einem pulverisierten Gestein (Anorthosit) aufgebaut, das zu einem hohen Anteil aus kalziumreichen Feldspat besteht (Anorthit). Dieselben Minerale kommen auf der Erde ebenfalls vor. Durch Verwitterung der Gesteine auf der Erdoberfläche oder durch Kontakt von im Meerwasser gelöstem  $\text{CO}_2$  mit Kalziumsilikaten entsteht aus  $\text{CO}_2$  und Kalzium (Ca) über Zwischenschritte Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ), das Mineral, das in verschiedenen Modifikationen Kalkstein, Muschel- oder Eierschalen aufbaut. Erst im Laufe der Erdentwicklung konnte durch Verdampfen von Meerwasser in flachen

Meeresbecken Kalk ausgefällt und so ein chemisches Sediment gebildet werden. Ein Vorgang, wie wir ihn in Regionen mit hartem Trinkwasser in den Kochtöpfen erleben. Aus der Art der sedimentären Kalkbildung können wir sicher ableiten, dass es am Anfang auf der Erde keine sedimentären Kalksteine gab. Heute bestehen große Teile der alpinen Gesteine, der Alb, der Schreiekreide auf Rügen, in Dänemark und England sowie vielen anderen Gebieten weltweit überwiegend aus Kalkstein mit dem Mineral Calcit. Wenn das ins Kristallgitter eingebaute  $\text{CO}_2$  von allen entsprechenden Kalksteinen der Erde berechnet wird, bekommen wir eine Vorstellung davon, wie viel  $\text{CO}_2$  durch die Mineralbildung aus der Atmosphäre entfernt wurde. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die  $\text{CO}_2$ -Entgasung der Erde bis heute anhält und das Volumen der über 4 Mrd. Jahre hinweg ausgetretenen Menge entsprechend berücksichtigt werden muss. Heute liegt der jährlich hinzukommende Anteil aus der Erde in einer Größenordnung von ca. 1 % des vom Menschen erzeugten  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes [13]. Auf der anderen Seite gibt es weitere Mineralbildungen, die, wie zum Beispiel mit Eisen, große Mengen  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre gebunden haben.

### **Achtung!**

An dieser Stelle benötigen wir für eine wichtige Überlegung in Gedanken eine Wandfläche, wie sie in fast jedem Kriminalfilm vorkommt. Dort werden die Fotos der Verdächtigen und die Indizien gruppiert und über Querverbindungen ein Bild konstruiert, das hilft, den Ablauf einer Straftat zu skizzieren. Auf unserer Wandfläche erscheint die Erde, die eigentlich, vom Abstand zur Sonne aus gesehen, ein Eisplanet sein müsste, weiterhin die noch schwache Sonne, die aber über eine hohe Strahlung verfügt (Ultraviolettstrahlung und Sonnenwind, s. Abschn. 5.7), ein Platz für den Mondbildungsprozess

und einer für das Magnetfeld, das sich erst im Laufe der Zeit aufbaut. Etwas weiter unten kommt die Atmosphäre, die eine Verbindungslinie zum Erdmagnetfeld und zur Sonne erhält. Gleichzeitig ist sie mit einem Feld für den Treibhauseffekt verknüpft, durch den sich die bewohnbare Zone des Sonnensystems nach außen vergrößert. Die Erde verlässt damit die Position des Eisplaneten. Und in der Mitte steht ein großes Fragezeichen. Wie konnte sich unter dem Einfluss des Sonnenwindes eine wärmeschützende Atmosphäre ausbilden, die den Planeten nach der Abkühlung eisfrei hielt, wenn das Magnetfeld der Erde erst nach und nach aufgebaut wurde? Hierzu gibt es noch keine klaren Aussagen. Auf jeden Fall muss für die Modelle, die die Entwicklung des Lebens auf der Erdoberfläche voraussetzen, auch die Frage einer vollständigen Vereisung während der ersten Hunderten Millionen Jahre geklärt sein.

## 2.5 Wie ging es weiter?

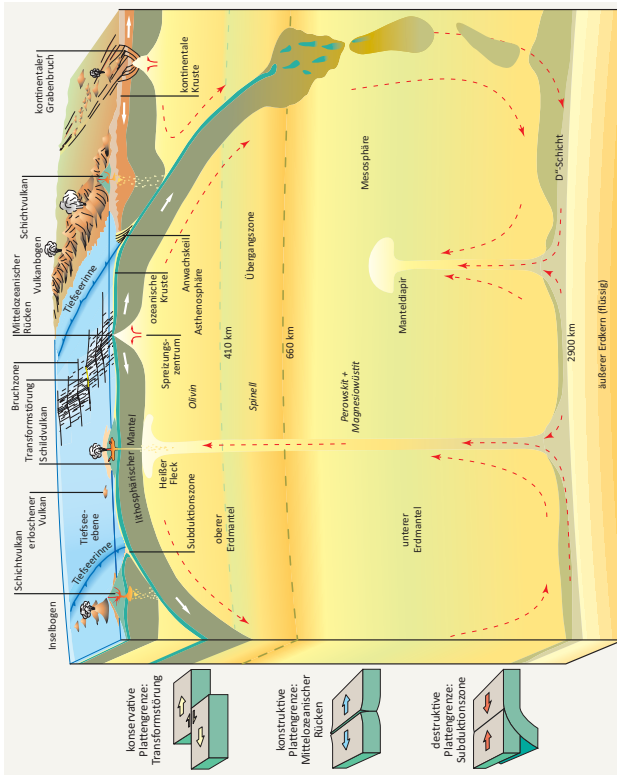
Genau das haben wir uns nach der Recherche der Ausgangsbedingungen auch gefragt. Die Beantwortung dieser Frage war von nicht geringer Bedeutung, da wir die verschiedenen Modelle zur Lebensentstehung diskutieren wollten, die ab einem bestimmten Zeitpunkt eine feste Erdoberfläche voraussetzen. Die Erdkruste stellt den Raum für Reaktionen bereit, bietet eine Grenzfläche zur Hydrosphäre und Atmosphäre, steht über Bruchzonen mit dem Erdmantel in Verbindung und liefert notwendige Ressourcen. In den späteren Kapiteln, in denen ich neue Überlegungen zur Entwicklung einer ersten Zelle vorstellen werde, nimmt die Existenz einer kontinentalen Kruste auf der jungen Erde eine zentrale Stellung ein.

Zuerst gab es, so viel war nach Vorstellungen zu den magmatischen Prozessen der jungen Erde klar, nur eine basaltische Kruste, die sich mit der Abkühlung nach der Kollision der Protoerde mit einem Kleinplaneten gebildet hatte. Sie besaß nur eine geringe Mächtigkeit (vielleicht einige Hundert bis Tausend Meter), die von einem hochaktiven Mantel mit starken Konvektionen unterlagert war. Schon früh muss das Mantel-Kruste-System begonnen haben, die Stoffe für die Bildung einer kontinentalen Kruste abzutrennen. Aus ihnen bildeten sich die Kernzonen der ersten Kontinente, die im Laufe der Zeit ständig wuchsen. Ein heute noch aktives Beispiel ist Island, das seine Existenz einer besonderen Lage an zwei Plattengrenzen und einer Überlagerung von zwei magmatischen Prozessen verdankt. Vor einer näheren Beschreibung der dortigen Verhältnisse gehe ich auf die Grundlagen der alles dominierenden Plattentektonik ein. Sie kann am besten das Verständnis für die Besonderheiten Islands vermitteln.

Unter Geowissenschaftlern wird seit langem ein Thema diskutiert, das den Zeitpunkt des Beginns der heute noch aktiven Plattentektonik zur Frage hat. Sie spielte eine entscheidende Rolle im Verlauf der Erd- und höheren Lebensentwicklung. In erster Linie steht sie für die Bildung großer Gebirge, deren Verwitterung zu einer nachhaltigen  $\text{CO}_2$ -Bindung führte. Die Verringerung des  $\text{CO}_2$  hatte unmittelbar Einfluss auf das Klima. Darüber hinaus entwickelten sich Sedimentationsräume, die die Sedimente der erodierten Gebirge aufnahmen, sowie Schelfgebiete, in denen sich zu späteren Zeiten die wichtigsten Entwicklungsschritte des höheren Lebens vollzogen. Eine besondere Bedeutung hatte die Plattentektonik vor allem nach Besiedlung der Kontinente mit der Trennung von Lebensräumen und deren Zusammenführung an anderer Stelle. Hinzu kommen die Einflüsse auf den marinen Raum mit chemischen Austauschprozessen in der

ozeanischen Kruste, dem Eintrag von metallhaltigen Lösungen in den ozeanischen Rücken und vieles mehr. Für die weitere Betrachtung ist daher eine kurze Darstellung der wesentlichen Faktoren hilfreich.

Der Motor der rezenten Plattentektonik ist eine Kombination aus mehreren Faktoren. Eine wandernde Platte hat unterschiedliche Grenzen. An der einen wird sie durch Zuwachs basaltischer Gesteinsmassen gebildet. Grundlage hierfür bildet Magma, das aufsteigt, zum Teil in den Förderkanälen stecken bleibt und kristallisiert und zum anderen Teil als Lava auf den Meeresboden ausfließt. Die Lava bildet einen speziellen Basalttyp, den Kissen- oder Pillow-Basalt. Dieser Plattenrand befindet sich an den ozeanischen Rücken, an denen zu gleichen Teilen die zur Seite auseinanderdriftenden Platten ergänzt werden. Das Magma hierfür stammt aus dem Mantel, in dem durch langsam ablaufende Konvektionsströme ein Volumenausgleich hergestellt wird. Die ozeanische Platte besteht heute in der Vertikalen immer aus zwei Teilen mit basaltischem Chemismus, einem oberen – der ozeanischen Kruste mit den Förderkanälen und den Pillow-Basalten (durchschnittlich 10 km mächtig) – und einem unteren mit einer Mächtigkeit von ca. 90 km, der Teil des oberen Erdmantels ist. Letzterer besteht bei den herrschenden Drücken und Temperaturen in dieser Tiefe aus einem festen Gestein. Erst der noch tiefer nachfolgende Mantel ist so heiß, dass er einen geringen Schmelzanteil besitzt und dadurch fähig wird, langsam zu fließen. Die Temperaturunterschiede zwischen unterem und oberem Mantel treiben die langsame Zirkulation an, die den Mantel durchmischt (Abb. 2.3). Sie ist vergleichbar mit der Zirkulation von Wasser in einem Topf, der auf einer heißen Herdplatte steht. Am ozeanischen Rücken ist die Mächtigkeit der Platte noch sehr gering, vielleicht nur wenige Kilometer, bestehend aus der



**Abb. 2.3** Schematische Darstellung der plattentektonischen Vorgänge an der Erdoberfläche und im Erdmantel.  
(© Springer-Verlag GmbH [14, S. 28])

Kruste und einem festen oberen Mantel. Erst mit größerer Distanz zum ozeanischen Rücken kühlt die Platte mehr und mehr ab, wodurch sich der untere Teil der Platte verdickt. So erreichen die am entferntest gelegenen Plattenteile das höchste Alter und die größte Mächtigkeit von mehr als 100 km. Die magmatischen Prozesse am linearen Ursprungsort der Platte führen zu einer Anhebung des gesamten ozeanischen Rückens über das durchschnittliche Niveau der ozeanischen Kruste. Die Folge der Heraushebung ist ein der Schwerkraft folgendes Abgleiten zur Seite, das die gesamte Platte betrifft. Der gegenüberliegende Rand der Platte wird durch ihr Abtauchen in den Mantel bestimmt, entlang einer Zone, die als Subduktionszone bezeichnet wird. Entlang der Subduktionszonen bilden sich Tiefseerinnen und über der abtauchenden Platte Vulkangürtel, die in einem charakteristischen Abstand zur Subduktionszone liegen (Abb. 2.3). Die Vulkangürtel gehören bereits zur benachbarten Platte, in der durch starke tektonische Spannungen Verwerfungszone entstehen. An ihnen finden starke Erdbeben statt. Die abtauchende Platte hat aufgrund der langen Abkühlungszeit auf dieser Seite die größte Mächtigkeit. Gleichzeitig besitzt sie eine höhere Dichte als das heiße unterlagernde Mantelmaterial. Als Folge sinkt sie in den plastisch verformbaren Mantel ein, wie eine Gehwegplatte, die in eine mit Morast gefüllte Senke gleitet. Hierdurch wird ein Zug auf die nachfolgende Masse der Platte ausgeübt, wodurch das Abgleiten von der relativ höher liegenden Position an ihrem Ursprungsort unterstützt wird. Hinzu kommt der Einfluss von Konvektionsströmungen im oberen, plastisch verformbaren Mantel, wenn diese in die gleiche Richtung verlaufen wie die Wanderung der gesamten Platte. Da die meisten Platten einen Teil mit ozeanischer und einen mit kontinentaler Kruste besitzen (z. B. die afrikanische Platte, bestehend aus dem



Hauptteil des afrikanischen Kontinents und nach Westen bis zum mittelatlantischen Rücken aus ozeanischer Kruste/Platte), werden durch die Wanderung auch Kontinente an die Plattengrenzen herangeführt, wodurch es zu Kollisionen mit anderen Kontinenten kommen kann. Die Folge sind die Bildung gewaltiger Gebirge und ein Wachstum der Kontinente.

Vermutlich hat es während der gesamten Frühphase der Krustenbildung bereits Bewegungen von Schollen der dünnen, heißeren Kruste gegeben, die von starken Konvektionen im Mantel angetrieben wurden. Die Prozesse, die wir heute in Verbindung mit der Plattentektonik beobachten, waren in dieser Form sicher noch nicht so deutlich ausgeprägt. Hierzu gehören die Bildung der Tiefseerinnen entlang der Subduktionszonen, die Vulkangürtel der Inselbögen, Kontinent-Kontinent-Kollisionen und vieles mehr.

Vulkane, die auf der jungen Kruste aufsetzten, wären die erste Adresse für Modelle, die eine Landoberfläche mit flachen Tümpeln und deren speziellen Bedingungen erfordern, lange, bevor sich Kontinentkerne entwickeln konnten. Allerdings konnten einzelne Vulkane nur geringe Höhen erreichen. Die aufgetürmten Massen wurden von der dünnen Kruste mit dem unterlagernden hochtemperierten Mantel nicht lange getragen und sanken förmlich ein. Die Menge des Ozeanwassers bzw. die Tiefe der Ozeane ist nicht bekannt. Es kann somit nicht abgeschätzt werden, inwieweit solche Vulkane aus dem Meer herausragten. Erst durch längere vulkanische Tätigkeit mit verstärkter Zufuhr von sich verändernden Magmen können sich lokal stabilere Mächtigkeiten der Kruste gebildet haben. Ein ungefähres Bild für diesen Fall vermittelt Island. Es kann als Beispiel für die Entwicklung von Landmassen dienen, die es geschafft haben, aus dem Wasser herauszuragen, während die gesamte Erdoberfläche von

einem Ozean bedeckt war. Auf Island verläuft von Norden nach Süden die Naht zwischen der nordamerikanischen und der eurasischen Platte. Islands Existenz ist zwei sich überlagernden Mantelprozessen zu verdanken. Es liegt einerseits genau auf einem mittelozeanischen Rücken, an dem eine ständige Produktion von Magmen im Normalfall gerade ausreicht, um den Verlust ozeanischer Kruste auszugleichen, der durch seitliches Abwandern der Platten entsteht. Andererseits wird die Produktion des Rückens von der Aktivität eines „Hot Spots“ überlagert, der einen zusätzlichen Beitrag an Magmen aus einem sehr langlebigen Reservoir tieferer Zonen liefert. „Hot Spots“ sind schlauchförmige, über Hunderte Millionen Jahre existierende Mantelregionen, aus denen Vulkane gespeist werden. Der Ursprung des aufsteigenden heißen Mantelmaterials wird an der Kern-Mantel-Grenze vermutet. Das bekannteste Beispiel für einen „Hot Spot“ ist die Kette der Hawaii-Inseln. Unter der südöstlichsten Insel Hawaii („Big Island“) liegt die aktive Zone, die die Vulkane Mauna Kea und Mauna Loa mit Magma versorgt. Gleichzeitig wandert die Platte nach Nordwesten und nimmt die Vulkaninsel mit. Irgendwann ist die Verbindung zu dem Zufuhrkanal über dem heißen Punkt abgeschnitten und ein neuer Vulkan beginnt sich, wieder weiter im Südosten, aufzubauen. Je weiter man die Spur nach Nordwesten verfolgt, desto älter und stärker abgetragen sind die mit der Platte weggewanderten Vulkane. Sie sind längst erloschen und verschwinden wie die ältesten nach und nach unter der Wasseroberfläche, weil die Platte insgesamt mit zunehmendem Abstand vom ozeanischen Rücken immer weiter absinkt.

Dadurch, dass Island direkt auf der Trennnaht zweier Platten liegt, kann es nicht als Einheit mit einer Platte wegwandern. Dies vollzieht lediglich die betreffende Hälfte, die mit der jeweiligen Platte gebildet wurde. Der

zentrale Teil Islands verbleibt ständig über dem „Hot Spot“. Es zeigt sehr schön, dass besondere, auch auf der jungen Erde bestimmte Bedingungen dazu führen konnten, dass sich Landmassen oberhalb des Meeresspiegels bildeten. Dies ist ein wichtiger Aspekt bei der Diskussion einiger Modelle zur Entstehung des Lebens, bei denen eine Landoberfläche gefordert wird. Aber Island bietet nicht nur eine Erklärung für die Entstehung von Land über dem Wasser.

Seine besondere Lage führte zu einer Vervierfachung der Krustenmächtigkeit und der Bildung veränderter Magmen. So haben sich in einigen markanten Vulkan-komplexen Magmen mit granitischem bzw. rhyolithischem Chemismus entwickelt. Rhyolithe sind die schnell abgekühlten vulkanischen Gesteine eines Magmas, aus dem in der Kruste durch langsame Kristallisation Granite gebildet werden. Sie sind eigentlich typisch für die kontinentale Kruste, die heute zwischen 30 und 40 km mächtig ist (und bis über 70 km an Gebirgswurzeln wie im Himalaya). Die Prozesse, die auf Island in einem rein basaltischen Umfeld der ozeanischen Kruste zur Bildung von typischen kontinentalen Krustengesteinen geführt haben, dauerten vielleicht 20 bis 30 Mio. Jahre. Sie machen deutlich, dass sich schon sehr früh im Zuge der fortschreitenden Abkühlung der Erde auch aus einem rein basaltischen Umfeld erste kontinentale Kruste gebildet haben kann. Dies ist für die letzte Modellbetrachtung von Bedeutung. Die kontinentale Kruste besitzt eine größere Mächtigkeit und eine geringere Temperatur als die basaltische ozeanische Kruste. Weiterhin ist sie chemisch bzw. mineralogisch viel heterogener und liefert ein breiteres Spektrum an Ausgangsstoffen. Jüngere Arbeiten über die Entwicklung der kontinentalen Kruste gehen davon aus, dass vor 4 Mrd. Jahren bereits 25 % der heutigen kontinentalen Massen vorhanden waren [15–17].

## Literatur

1. Connelly JN, Bizzarro M, Krot AN, Nordlund A, Wielandt D, Ivanova MA (2012) The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science* 338:651–655
2. Canup RM (2012) Forming a moon with an Earth-like composition via a giant impact. *Science* 338(6110):1052–1055
3. Ćuk M, Hamilton D, Lock SJ, Stewart ST (2016) Tidal evolution of the moon from a high-obliquity, high-angular-momentum Earth. *Nature* 539:402–406
4. Lock SJ, Stewart ST, Petaev MI, Leinhardt ZM, Mace MT, Jacobsen SB, Ćuk M (2018) The origin of the moon within a terrestrial synestia. *J Geophys Res* 123(4):910–951
5. Morbidelli A, Lunine JJ, O'Brien DP, Raymond SN, Walsh KJ (2012) Building terrestrial planets. *Ann Rev Earth Planet Sci* 40:251–275
6. Labrosse S, Hernlund JW, Coltice N (2007) A crystallizing dense magma ocean at the base of the Earth's mantle. *Nature* 450:866–869
7. Tarduno JA, Cottrell RD, Davis WJ, Nimmo F, Bono RK (2015) A Hadean to Paleoarchean geodynamo recorded by single zircon crystals. *Science* 349(6247):521–524
8. Tarduno JA, Cottrell RD, Watkeys MK, Hofmann A, Doubrovine PV, Mamajek EE, Liu D, Sibeck DG, Neukirch LP, Usui Y (2010) Geodynamo, solar wind, and magnetopause 3.4 to 3.45 billion years ago. *Science* 327:1238–1240
9. Jakosky BM, Lin RP, Grebowsky JM et al (2015) The mars atmosphere and volatile evolution (maven) mission. *Space Sci Rev* 195(1–4):3–48
10. Lammer H, Zerkle AL, Gebauer S (2018) Origin and evolution of the atmospheres of early Venus, Earth and Mars. *Astron Astrophys Rev* 26:2. <https://doi.org/10.1007/S.00159-018-0108-y>
11. O'Brien DP, Walsh KJ, Morbidelli A, Raymond SN, Mandell AM (2014) Water delivery and giant impacts in the „Grand Tack“ scenario. *Icarus* 239:74–84

12. NASA/JPL-Caltech/R Hurt (SSC-Caltech) (2004) <http://www.spitzer.caltech.edu/images/2638-ssc2004-05d-Orbit-Comparisons>
13. Hards VL (2005) Volcanic contributions to the global carbon cycle. *Brit Geol Surv Occ Pub* 10:1–20
14. Meschede M (2018) *Geologie Deutschlands*. Springer, Berlin
15. Rosas JC, Korenaga J (2018) Rapid crustal growth and efficient crustal recycling in the early Earth: implications for Hadean and Archean geodynamics. *Earth Planet Sci L* 494:42–49
16. Rozel AB, Golabek GJ, Jain C, Tackley PJ, Gerya T (2017) Continental crust formation on early Earth controlled by intrusive magmatism. *Nature* 545:332–335
17. Dhuime B, Hawkesworth CJ, Cawood PA, Storey CD (2012) A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago. *Science* 335:1334–1336



# 3

## Die engeren Rahmenbedingungen: Die Chemie, die Physik und die physikalische Chemie, ohne sie geht es nicht

### Inhaltsverzeichnis

3.1	Die chemischen Ressourcen des Lebens . . . . .	47
3.2	Die Chemie hat ihre eigenen Gesetze . . . . .	55
3.3	Katalysatoren beschleunigen die Reaktion erheblich. .	57
3.4	Verdünnung – keine Reaktion ohne Konzentration ..	59
3.5	Entropie und kein Ende . . . . .	61
3.6	Chiralität – was ist das denn? . . . . .	65
	Literatur . . . . .	70

### 3.1 Die chemischen Ressourcen des Lebens

Ein Hauptproblem in der Diskussion um die Entstehung des Lebens sind die fehlenden Dokumente und Kenntnisse der Rahmenbedingungen der Anfangszeit. Nach den im ersten Teil betrachteten planetaren Gegebenheiten müssen für die Rückschlüsse der eigentlichen

biochemischen Entwicklung in erster Linie der Aufbau und die Zusammensetzung der heutigen Zelle sowie die Prozesse, die in ihr ablaufen, herangezogen werden. Daraus lassen sich Minimalanforderungen erschließen, die die chemischen und physikochemischen Voraussetzungen für den Lebensursprung eingrenzen. Notwendig ist daher die Betrachtung aller relevanten Ressourcen und einwirkenden Faktoren auf den Entstehungsprozess, sofern sie aus heutiger Zeit für die Zeit vor 4 Mrd. Jahren übertragen werden können.

Die Schwierigkeiten, die sich bei der Diskussion über das Wie bei der Entstehung des Lebens ergeben, hängen unmittelbar mit dem Ort des Geschehens zusammen. Zuerst müssen organische Ausgangsmoleküle in ausreichender Menge zur Verfügung gestanden haben. Die Elemente, die für die einfachste Form einer lebenden Zelle erforderlich sind, beschränken sich zunächst auf Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Sauerstoff (O), Phosphor (P) und untergeordnet Schwefel (S). Diese Elemente müssen ständig über einen langen Zeitraum in dem Bildungsumfeld zur Verfügung gestanden haben, sodass sich aus ihnen erste größere Moleküle bilden konnten. Die betreffenden Elemente sind im interstellaren Staub/Meteoriten/Kometen, der Atmosphäre, dem Ozean und der Erdkruste in unterschiedlichen Konzentrationen vorhanden. Aber jedes größere Molekül benötigt seine eigenen Bedingungen, um aus den Ausgangsprodukten gebildet zu werden. Es ist zum Beispiel nicht denkbar, dass in einem eng begrenzten Umfeld alle notwendigen Komponenten vorhanden waren und sich daraus Aminosäuren, organische Basen oder Zucker bilden konnten. Selbst die in unserem Körper vorhandenen Aminosäuren haben jede für sich unterschiedliche Bildungsbedingungen. Sie hängen zum Beispiel ab von dem pH-Wert der wässrigen Lösung, der Temperatur oder von den beteiligten Ionen.

Aber sehen wir uns erst einmal die wenigen Elemente an, die letztendlich dafür stehen, was das Leben ausmacht, welche Besonderheiten sie besitzen und wie sie in und auf der jungen Erde vertreten waren.

### **Kohlenstoff**

Kohlenstoff ist ein Element, das am Anfang der Erdentstehung überwiegend in Verbindung mit Sauerstoff als Gas oder gelöst im Erdinneren vorkam. Neben der reduzierten Form Kohlenstoffmonoxid (CO) gab es die oxidierte des Kohlenstoffdioxids (CO<sub>2</sub>). Durch vulkanische Aktivitäten und durch Austritt aus Bruchzonen der Kruste gelangten die Gase aus dem Erdmantel in die Atmosphäre, wo sie einen wesentlich größeren Anteil hatten als heute. Die Angaben hierzu aus den bisher durchgeführten Untersuchungen variieren stark, da es nur indirekte Nachweismethoden für die Höhe der Konzentration gibt (s. Abschn. 2.4).

### **Wasserstoff**

Unter den Bedingungen der frühen Erde war Wasserstoff im Erdmantel und der Kruste gelöst oder als Gas vorhanden. Er ist, sobald er gasförmig auftritt, wie Stickstoff oder auch Sauerstoff immer durch zwei Atome zu einem Molekül (H<sub>2</sub>) verbunden. Mit Sauerstoff bildet H<sub>2</sub> ein Wassermolekül, eine sehr stabile Verbindung, die nur mit größerem Energieeinsatz getrennt werden kann. Der Wasserstoff gelangte durch vulkanische Prozesse oder stetige Ausgasung an Bruchzonen der Erdkruste in die Atmosphäre. Dort konnte er aufgrund der geringen Masse nicht lange gehalten werden und driftete in den Weltraum ab. Unter Bedingungen der oberen Erdkruste kann Wasserstoff mit CO und CO<sub>2</sub> reagieren und langkettige, organische Moleküle bilden. Derartige Moleküle sind zum Teil wichtige Grundbausteine für die Entwicklung



komplexerer Moleküle. Eine technische Variante hierzu wird in der Fischer-Tropsch-Synthese genutzt.

### Fischer-Tropsch-Synthese

Die Chemiker Franz Fischer und Hans Tropsch entwickelten 1925 am Kaiser-Wilhelm-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr ein Verfahren zur Verflüssigung von Kohle, mit dem Ziel, Benzin und andere langkettige organische Verbindungen herzustellen. Die nach ihnen benannte Fischer-Tropsch-Synthese war Grundlage für die Kraftstoffherstellung im Zweiten Weltkrieg, die wegen fehlender Erdölvorkommen und Lieferblockaden aus Braun- und Steinkohle gedeckt werden musste. Das Verfahren verläuft mehrstufig. Zuerst muss aus der Kohle ein Synthesegas hergestellt werden, das aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff besteht. Anschließend wird das Gemisch unter bis zu 25 bar Druck gesetzt und auf Temperaturen zwischen 160 bis 300 °C erhitzt. Unter Verwendung geeigneter Katalysatoren aus Kobalt oder Eisen reagieren die Komponenten zu langkettigen Kohlenwasserstoffen. Durch Variation von Temperatur und Druck lassen sich verschiedene Produkte gewinnen, die von Kraftstoffen über synthetische Öle bis zu hochwertigen organischen Verbindungen reichen. Neben anderen Ausgangsprodukten wie zum Beispiel Erdgas oder Biomasse kann auch Kohlenstoffdioxid mit angepassten Synthesebedingungen verwendet werden.

### Haber-Bosch Verfahren

Ein weiteres großtechnisches Verfahren, das Relevanz für Prozesse in der Erdkruste hat, ist das Haber-Bosch-Verfahren zur Herstellung von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Für ihre in Zusammenhang mit der Ammoniaksynthese stehenden Forschungsergebnisse erhielten Fritz Haber 1918 und Carl Bosch 1931 den Nobelpreis für Chemie. Ammoniak wird als Grundstoff für verschiedene Stickstoffverbindungen genutzt, die überwiegend für Düngemittel verwendet werden. Wie bei der Fischer-Tropsch-Synthese werden Gase unter Verwendung geeigneter Katalysatoren unter hohem Druck und hohen Temperaturen gesetzt, sodass sich die gewünschte Reaktion einstellt. Für die  $\text{NH}_3$ -Synthese

wird Stickstoff direkt aus der Luft gewonnen und mit Wasserstoff zur Reaktion gebracht. Der Prozess erfolgt bei Drucken von 150 bis 350 bar und Temperaturen zwischen 400 und 500 °C unter Verwendung von eisenhaltigen Katalysatoren.

### Stickstoff

Stickstoff ist ebenfalls im Erdmantel gelöst und wurde als Gas mit Abkühlung der Erde nach und nach freigesetzt. Er spielt für die Bildung von Mineralen im Erdmantel und der Kruste kaum eine Rolle. Stickstoff kann unter den Druck- und Temperaturbedingungen des Erdmantels und der Kruste mit Wasserstoff reagieren. Es bildet sich Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), das möglicherweise zu Beginn einen größeren Anteil am Aufbau der Atmosphäre hatte als reiner Stickstoff. Ähnliche Bedingungen werden im Haber-Bosch-Verfahren zur großtechnischen Gewinnung von Ammoniak eingestellt (s. Kasten). Weiterhin kann sich mit Wasserstoff und Stickstoff Cyanwasserstoff oder Blausäure ( $\text{HCN}$ ) bilden, ein wichtiger Ausgangsstoff für die Bildung organischer Basen. Stickstoff ist unter Normalbedingungen auf der Erde ein Gas, in dem immer zwei Atome ein Molekül bilden ( $\text{N}_2$ ). In dieser Form ist Stickstoff sehr reaktionsträge. Das Gas bildet heute mit einem Anteil von 78 % den Hauptanteil der Atmosphäre. Hier kann es neben Sauerstoff existieren, ohne mit ihm zu reagieren. Der Bedarf an Stickstoff für die Lebenswelt ist hoch. Obwohl die Ressourcen in der Atmosphäre nahezu unerschöpflich sind, ist Stickstoff aufgrund der Reaktionsträgheit des  $\text{N}_2$ -Moleküls für biologische Prozesse kaum nutzbar. Es waren in der Evolution bestimmte Entwicklungsschritte erforderlich, die die Voraussetzungen der Nutzbarkeit für die Lebenswelt bei steigendem Bedarf schufen.

## Sauerstoff

Sauerstoff ist nach Eisen das zweithäufigste Element der Erde. Es bildet eine Hauptkomponente in den meisten gesteinsbildenden Mineralen, die durch ein Gerüst aus Siliziumdioxidtetraeder ( $\text{SiO}_4$ -Tetraeder) aufgebaut sind. Siliziumdioxidverbindungen sind chemisch sehr stabil und stehen als Sauerstoffquelle kaum zur Verfügung. Leichter verwendbar für biochemische Prozesse sind das Wassermolekül, aus dem durch unterschiedlichste Reaktionen Sauerstoff oder das Hydroxyl-Radikal (OH-Molekül) verwendet werden kann sowie die beiden Verbindungen des Kohlenstoffs mit Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Kohlenstoffmonoxid (CO).

## Phosphor/Phosphat

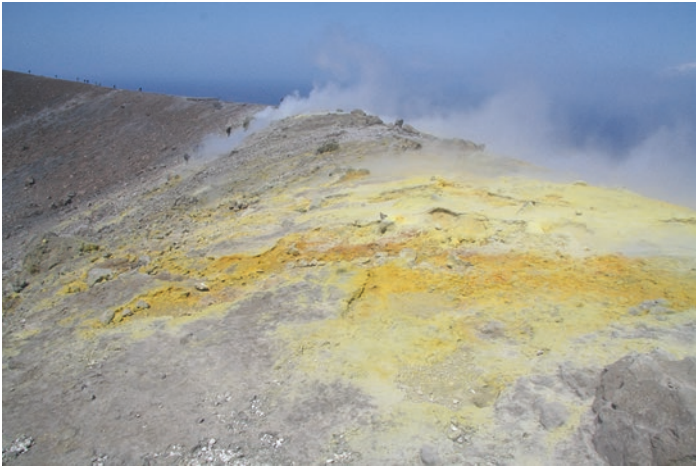
Phosphor kommt weder im Erdinneren noch an der Erdoberfläche in reiner Form vor. Er ist in großen Mengen im Mineral Apatit in der Erdkruste enthalten. Diese Minerale sind in manchen Gesteinen so stark vertreten, dass sie als gesteinsbildend gelten. Kommen sie in Spalten der Erdkruste mit heißen, sauren Lösungen in Kontakt, lösen sie sich vollständig auf und stellen ausreichend Phosphat für verschiedene Reaktionsschritte zur Verfügung. Phosphat ist eine Phosphor-Sauerstoff-Verbindung, die sehr leicht mit anderen Elementen stabile Verbindungen eingeht und sehr widerstandsfähige Minerale bildet. So reagiert Kalzium mit freiem Phosphat zum an der Erdoberfläche schlecht löslichen Mineral Apatit, unserem Mineral aus der Erdkruste. Apatit ist aber auch der Stoff, aus dem unter anderem unsere Zähne aufgebaut sind, die härtesten Bestandteile unseres Körpers. Bei biochemischen Prozessen ist Phosphat die wichtigste anorganische Verbindung, ein Nährstoff, der für kräftige Algenblüte sorgt, wenn er mit phosphathaltigen Waschmitteln in die Gewässer gelangt. Phosphat bildet das Rückgrat der DNA und RNA und

ist Teil der wichtigsten Energieträger der Zelle (Adenosin-triphosphat [ATP] und Guanosintriphosphat [GTP]).

Es gab so gut wie keine Phosphatquelle, die auf der Erdoberfläche einem beginnenden Leben zur Verfügung gestanden hat, mit einer Ausnahme: In Eisenmeteoriten tritt ein charakteristisches Phosphormineral auf, das vor 170 Jahren von dem österreichischen Chemiker Adolf Patera entdeckt wurde. Er benannte es zu Ehren des Naturwissenschaftlers Karl Franz Anton von Schreibers nach dessen Namen. Schreibersit ist wasserlöslich, sodass die chemische Verwitterung der Meteorite Phosphor freisetzt. Heute wird Phosphor unter der Sauerstoffatmosphäre schnell oxidiert und in Kontakt zu Kalzium in einem Mineralgitter fixiert. Auf der jungen Erde waren die Verhältnisse ohne Sauerstoff komplexer. Eine Reaktion von Phosphor mit dem Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) konnte den erforderlichen Sauerstoff bereitstellen, sodass Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) gebildet wurde. In der Diskussion um die Bedeutung der extraterrestrischen Zufuhr von Bausteinen für das Leben spielt dieser Aspekt eine größere Rolle. Meteorite können einen Beitrag zur Phosphatversorgung geliefert haben [1].

## Schwefel

Schwefel (S) kommt sowohl in reiner Form an der Erdoberfläche als auch in Verbindung mit Metallen oder im Kristallgitter von Mineralen vor. Er ist ein Begleiter vieler magmatischer Prozesse. Vulkanische Gase bringen Schwefel in Verbindung mit Wasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) oder Sauerstoff ( $\text{SO}_2$ ) an die Oberfläche, wo er bei ausreichender Konzentration als elementarer Schwefel ausfallen kann. Ein gut erreichbares Beispiel ist der Kraterrand des Vulcano in Süditalien, der Nachbarinsel von Lipari (Abb. 3.1). Hier haben die heißen Schwefeldämpfe Teile des Kraters mit einem satten Gelb überzogen. Große explosive



**Abb. 3.1** Schwefelaustritte am Kraterrand des Vulcano, Äolische Inseln, Süditalien

Vulkanausbrüche befördern das Schwefelgas hoch in die Atmosphäre, wo es als Aerosol einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Strahlungsbilanz des Systems Sonne–Erde ausüben kann. Der Ausbruch des Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991 führte zum Beispiel im Folgejahr zu einer Abkühlung von  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf der Nordhemisphäre. Schwefel nimmt in der Biochemie eine zum Teil nicht ganz unbedeutende Rolle ein. Zusammen mit Eisen bildet es Eisen-Schwefel-Cluster, die an Enzymreaktionen beteiligt sind. Es gibt darüber hinaus zwei Aminosäuren, die Schwefel enthalten (Cystein und Methionin). Cystein spielt bei der Faltung der Proteine (Aminosäureketten mit mehr als 100 Aminosäuren) eine Rolle, indem es spezielle Brückenverbindungen in den Aminosäureketten ausbildet (Disulfidbrücken).

Jedes der vorgestellten Elemente war zu Beginn ausreichend auf der Erde vertreten und verfügbar, wenn auch, wie im Fall des Phosphors, unter speziellen Bedingungen.

Allein ihre Verfügbarkeit gibt keinen Anlass, dass sie sich in Teilen zusammenfinden, miteinander reagieren und komplexe Moleküle bilden.

Wir haben mit den Elementen im übertragenen Sinn so etwas wie Buchstaben, mit denen wir Worte bilden können. Es ist nicht bekannt, wie lang die Worte und die Reihenfolge der Buchstaben sein sollen, welche Bedeutung die Worte haben, wie sie in Sätze zu integrieren sind und welche Grammatik den Sätzen einen Sinn gibt. Es gibt keine Anleitung, die darauf hinweist, dass daraus Kapitel, Seiten und Bücher geschrieben werden können, die Informationen speichern oder Handlungsanweisungen geben. Wenn also lediglich die nackten Buchstaben als große Ansammlung vor uns liegen, müssen grundlegende Regeln definiert werden, die ein sinnvolles Kombinieren der Buchstaben ermöglichen. In der Chemie unterliegen alle Elemente physikochemischen Naturgesetzen. Durch sie werden die Möglichkeiten vorgegeben, Verbindungen mit anderen einzugehen oder diese wieder zu verlassen. Das Verständnis der Gesetzmäßigkeiten ist Voraussetzung dafür, die Schritte auf dem Weg zum Leben, „die Worte, Sätze, Seiten und ganzen Bücher“, im Übergang von der rein anorganischen Chemie zur organischen und biochemischen nachvollziehen zu können.

## 3.2 Die Chemie hat ihre eigenen Gesetze

Chemische Reaktionen zwischen Molekülen verlaufen in einer komplexen Art und Weise, die sich in einem für jede Reaktion typischen Energiediagramm darstellen lässt. Neben den Reaktionsenergien muss die Reaktionsgeschwindigkeit als eine weitere bedeutende Größe berücksichtigt werden. In einem geschlossenen System stellt sich

immer ein Gleichgewicht zwischen den Edukten, den Ausgangsmolekülen, und den Produkten, den neu entstandenen Stoffen, ein. Kommt es zu einer Verbindung von zwei Molekülen (wobei die eigentliche Anzahl der Moleküle bei kleinsten von uns verwendbaren Mengen immer gleich astronomisch hoch wird), so gibt es gleichzeitig auch einen Zerfall dieser vorab gebildeten Verbindung. Jetzt kommt es darauf an, auf welcher Seite das Gleichgewicht liegt. Vergleichbar ist dies mit einer Balkenwaage, die im Gleichgewicht ist, obwohl die Gewichte auf beiden Seiten sehr unterschiedlich verteilt sind. Erreicht wird die Balance durch die Lage des Drehpunkts, der nicht mittig unter dem Balken liegt. Die Seite mit dem höheren Gewicht hat den kürzeren Balken, die andere den entsprechend längeren, um in das Gleichgewicht zu kommen. So gibt es Reaktionsgleichgewichte, die zum überwiegenden Anteil zum Reaktionsprodukt führen und wenig Edukte auf der anderen Seite belassen. Trotzdem wandelt sich ein Teil des Reaktionsprodukts wieder in die Edukte zurück. Das läuft ständig hin und her, mit dem Ergebnis, dass sich von außen gesehen irgendwann ein Gleichgewicht eingestellt hat, mit der Bevorzugung der einen oder anderen Seite. Es handelt sich hierbei also nicht um ein statisches, sondern um ein dynamisches Gleichgewicht. Eine besondere Bedeutung bekommt die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Bildung großer organischer Moleküle, wie der RNA oder DNA. Viele Versuchsreihen in den Laboratorien haben gezeigt, dass für die Entwicklung eines langen RNA-Strangs unter präbiotischen Bedingungen ein bislang noch nicht gelöstes Problem besteht. Der Zerfall einer RNA zu kleineren Strangabschnitten erfolgt schneller als der Aufbau zu längeren Ketten. Es müssen daher Bedingungen oder Katalysatoren gefunden werden, die die Entwicklung langer RNA-Moleküle ermöglichen, so, wie es mit den heutigen Enzymen in der Zelle geschieht.

### 3.3 Katalysatoren beschleunigen die Reaktion erheblich

Bei einigen chemischen Reaktionen sind die Geschwindigkeiten der Produktbildung so langsam und der Zerfall der gebildeten Produkte so hoch, dass das Gleichgewicht fast vollständig auf der Seite der Ausgangsprodukte liegt. Mit anderen Worten, sie reagieren so gut wie nicht miteinander. Nehmen wir eine große Schale, an deren Außenrand zwei Kugeln genau gegenüber festgehalten werden. Jede Kugel – sie stehen hier stellvertretend für jeweils ein Molekül – hat an einer Stelle einen sehr kleinen Magneten, die eine den positiven, die andere den negativen Pol. Wir lassen die Kugeln gleichzeitig los, sie rollen schnell in die Mitte der Schale, verfehlen sich oder treffen sich. Im letzten Fall schlagen sie fest gegeneinander und stoßen sich wieder ab. Hierdurch laufen sie wieder den Rand zum Teil nach oben, kehren um und können sich erneut wieder treffen oder verfehlen. Durch leichtes Schwingen der Schale bleiben die Kugeln immer in Bewegung. Nach vielen Versuchen treffen die beiden Kugeln irgendwann einmal genau mit den kleinen Magneten so zusammen, dass sie aneinander haften bleiben. Sie haben es geschafft, eine Verbindung einzugehen. Auf diese Art und Weise können wir uns die meisten chemischen Reaktionen vorstellen.

Jetzt lässt sich die Treffsicherheit in vielen Fällen dadurch erhöhen, dass ein Katalysator eingesetzt wird. Dies ist ein chemisches Werkzeug, das die Reaktion beschleunigt, ohne selbst verbraucht zu werden. Das Gleichgewicht der Reaktion wird allerdings nicht verschoben. Lediglich die Bildung der Produkte (und deren Zerfall) werden beschleunigt. Mit einer Trennung der Produkte vom Reaktionsprozess kann man die Ausbeute steigern. Im Fall eines Enzyms kann man sich den Katalysator



wie eine Rohrzange vorstellen, die in der Lage ist, eine der Kugeln so festzuhalten, dass der kleine Magnet optimal nach außen gerichtet ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass die zweite Kugel mit ihrem eigenen Magneten genau auf den anderen der festgehaltenen Kugel trifft, ist jetzt viel höher.

In der Natur haben sich Enzyme als perfekte Katalysatoren entwickelt. Es sind lange, kompliziert gefaltete Aminosäureketten, die Taschen für jeweils ganz bestimmte Moleküle bereitstellen. Sie halten zum Beispiel Aminosäuren im wässrigen Milieu so perfekt fest, dass sie mit einer RNA (z. B. der Transport-RNA [tRNA]) verbunden werden können. Auch die Verknüpfung von zwei Aminosäuren im Wasser allein durch zufälligen Kontakt findet kaum statt. Der Grund liegt darin, dass die Verbindung nur zustande kommt, wenn von jeder der beiden beteiligten Aminosäuren ein Baustein abgegeben wird: ein Wasserstoffatom auf der einen und ein OH-Molekül auf der anderen Seite. Die beiden Bausteine werden im selben Schritt zu einem Wassermolekül verbunden und abgegeben. An den frei werdenden Stellen der Aminosäuren findet anschließend die Verknüpfung statt. Und das ist das Problem, wenn die Reaktion im Wasser stattfinden soll: Dort sind bereits überall Wassermoleküle vorhanden, die die Reaktionspartner umgeben und sie voneinander fernhalten. So sorgen sie dafür, dass die Abgabe des Wasserstoffatoms und des OH-Moleküls nur selten stattfinden kann. Dies ist aber eine Voraussetzung für die Freigabe der Verbindungsstellen an den beiden Aminosäuren, damit sie verknüpft werden können.

Es stellt sich die Frage, wie Aminosäuren in der Frühphase der Erdentwicklung chemisch zu längeren Ketten reagieren konnten, und zwar im Wasser, das als Hauptmedium für die organische Chemie angenommen wird. Eine Möglichkeit wäre, das Wasser außen vor zu lassen – zumindest zeitweise, wie es bei zyklischem Trockenfallen

in flachen Tümpeln der Fall ist – oder durch Wasserentzug, wie er an einer Grenzfläche von Mineralen auftreten kann. Am leichtesten wären die Reaktionen in einem organischen Lösungsmittel abgelaufen. Hier finden die Verknüpfungen ohne Gegenspieler statt, die die Abgabe des Wassermoleküls behindern. Aber wo sollte in der Frühzeit der Erdentwicklung ein organisches Lösungsmittel wie zum Beispiel Alkohol oder Terpentin herkommen? Erst durch den Abbau von Organismen wurden die Voraussetzungen für die Bildung derartiger Verbindungen geschaffen. Der Weg hierzu war komplex. Er bestand aus dem Ansammeln von Biomasse in sandigen und tonigen Sedimenten, ihrer langsamen Umwandlung unter Druck, den nachfolgend auflagernde Sedimentschichten ausübten, und Temperaturen, wie sie in der Tiefe von einigen Tausenden Metern auftreten, und das alles in sehr langen geologischen Zeiträumen. Erst hierdurch, durch einen langsamen Umbau der Biomasse und das anschließende Sammeln der fließfähigen Anteile in kleinen Porenräumen, entstand Erdöl, aus dem wir einen Großteil unserer organischen Lösungsmittel gewinnen.

### **3.4 Verdünnung – keine Reaktion ohne Konzentration**

Mit dem Bild der Erdölentstehung wird bereits deutlich, dass für biochemische bzw. organisch-chemische Reaktionen eine hohe Konzentration der beteiligten Komponenten vorliegen muss, um in realistischen Zeiträumen neue Reaktionsprodukte zu bekommen. Angenommen, es gab einen Prozess, der alle für die Entwicklung des Lebens erforderlichen Bausteine zur Verfügung stellte und sie nach und nach in den Ozean entließ. Es ist leicht vorstellbar, dass die Konzentrationen von Aminosäuren,

Basen und Zuckern unendlich groß gewesen sein müssten, damit sich einzelne Moleküle in den Weiten der Meere überhaupt jemals wieder treffen konnten. Ein Vorgang, der eine ständige Auslese von Molekülen und ein fortwährendes Kombinieren mit hohen Konzentrationen benötigt, ist im freien Ozean nicht denkbar. Wenn entsprechende Bausteine des Lebens ins Meer gelangten, lag eine unendliche Verdünnung vor. Von einer Ursuppe des frühen Ozeans kann keine Rede sein. Eine Anreicherung in flachen Gewässern der Randbereiche von Vulkaninseln oder ersten Kontinenten hätte eine Alternative sein können. Allerdings gab es in diesen Zonen das Problem der ständigen Überflutungen durch starke Gezeitenwellen und besonders nach Meteoriteneinschlägen. Hierdurch wären jedes Mal ein Großteil der Moleküle in den offenen Ozean ausgewaschen worden, wodurch die notwendige Masse der Reaktionspartner verloren gingen.

Nein, jedes plausible Modell erfordert einen Transport von Molekülen zu der Stelle, an der die Reaktionen stattfinden können. Hierbei ist eine hohe Konzentration mit ständigem Nachschub genauso wichtig wie eine Abfuhr überflüssiger Komponenten. Dieser letzte Aspekt ist erst in den letzten Jahren deutlich geworden. Es hat sich gezeigt, dass bei ständiger Zufuhr organisch-chemischer Verbindungen in einen geeigneten Bereich, in dem die Moleküle reagieren können, die Reaktionsfähigkeit nach und nach zum Erliegen kommt. Der unbrauchbare Teil muss ständig entsorgt werden, sonst wird der Brei zu dick, die Bildungsprozesse ersticken. Letztendlich entsteht Teer, der diesem Phänomen den Namen gegeben hat [2]. Bei allen Überlegungen, die die Bildung der ersten Zelle zum Ziel haben, muss von Anfang an das Teerproblem berücksichtigt werden. Es kommen daher nur Umgebungen in Frage, die ein offenes System mit Zu- und Abfuhr der Reaktionsstoffe garantieren.

## 3.5 Entropie und kein Ende

Und dann gibt es noch das Lieblingsstichwort der Physikochemiker, die Entropie, eine sehr wichtige thermodynamische Zustandsgröße. Gleich zu Beginn der Diskussion um die Entstehung des Lebens gab es Fragen, wie sich die Entropie in Bezug auf das Leben verhält. Im Grunde arbeitet das Leben gegen die Entropie. Was meinen die Kollege aus der physikalischen Chemie damit, was ist die Entropie und warum ist sie eine so wichtige Größe?

Eigentlich ist es unglaublich: Es ist ein Begriff, den kaum jemand kennt. Dabei ist die Entropie mindestens genauso wichtig für alle Prozesse im Weltraum und um uns herum, wie die Energie. Die meisten, die schon einmal etwas von ihr gehört haben, können sie nicht genau einordnen und nur wenigen Spezialisten ist die Bedeutungsschwere dieses Begriffs richtig bewusst. Entropie wird umgangssprachlich auch als ein Maß für die Unordnung bezeichnet. (Eltern kennen übrigens bestens den Vorgang der Entropieerzeugung in den Zimmern ihrer Kinder.) Gäbe es die Entropie nicht, gäbe es das Weltall, wie wir es kennen, nicht. Gleich mit dem Beginn, wie immer er auch aussah, spielte die Entropie eine entscheidende Rolle. Das Weltall startete mit der Ausdehnung – ein Prozess, der bis heute anhält. Man kann auch vereinfacht sagen, die Unordnung im System Weltall nahm und nimmt zu. Und so ist das überall. Im Großen wie im Kleinen, bei den einfachsten chemischen Reaktionen, bei komplexen physikalischen Vorgängen oder bei Abläufen, die wir selbst gestalten. Bei allen Reaktionen muss es in der Summe eine Zunahme der Entropie geben. Ein gutes Beispiel ist das Gefrieren von Wasser. Wenn Wasser gefriert, bilden sich Eiskristalle. Kristallisation bedeutet, dass jedes Wassermolekül einen

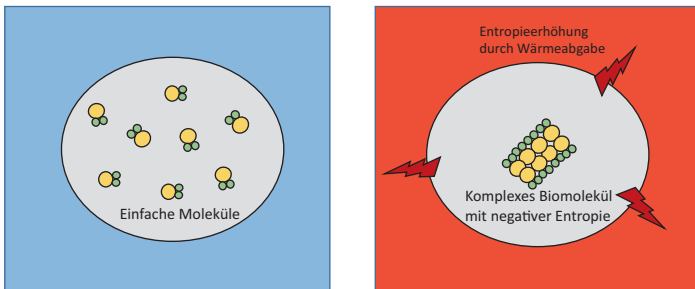
festen Platz in einem bestimmten Abstand zu seinem Nachbarmolekül einnimmt und nicht mehr beweglich ist wie im flüssigen Zustand. Es bildet sich ein Kristallgitter mit einem hohen Maß an Ordnung. Dieses Bild ist vergleichbar mit einer Menschenmasse in einer Fußgängerzone vor einem Schlussverkauf oder der gleichen Anzahl an Personen, die für eine Militärparade in immer gleichem Abstand auf einem Paradeplatz stehen. Kristallisation beziehungsweise Ordnung verstößt somit eindeutig gegen das Prinzip der Entropiezunahme. Um das Entropieprinzip, das heißt die notwendige Erhöhung der Entropie bei einem Vorgang, dennoch zu erfüllen, wird bei der Einnahme der Wassermoleküle auf ihren Plätzen im Gitter Wärme erzeugt und nach außen abgegeben. Hierdurch wird die Entropie insgesamt größer, als sie vor dem Gefrierprozess war. Den Wärmeabgabeprozess machen sich die Obstbauern zu Nutze, wenn im Frühjahr die Blüte der Obstbäume bei einem Kälteeinbruch zu erfrieren droht. Sie besprühen die Blüten mit Wasser, welches kristallisiert und dabei so viel Wärme freisetzt, dass die Blüten keinen Schaden nehmen. Um das Eis wieder aufzutauen, muss entsprechend wieder Wärmeenergie zugeführt werden, wodurch die geordneten Plätze im Gitter aufgegeben und die Wassermoleküle in eine ungeordnete Bewegung als flüssiges Wasser überführt werden. Auch hierbei erhöht sich die Entropie.

Wir selbst erleben dieses Prinzip übrigens häufig genug am eigenen Körper. Das Aufräumen der Wohnung erhöht insgesamt die Entropie, obwohl Ordnung geschaffen wird und dabei lokal im Zimmer die Entropie abnimmt. Wir werfen vieles weg, das weit entfernt von uns entsorgt wird. Wir schwitzen und geben somit Wärme ab. Und das alles erhöht die Entropie. Oder nehmen wir die Computer: Hier laufen allein beim Schreiben einer E-Mail eine große Anzahl ordnender Prozesse ab. Wie wird die Entropie

erhöht? Wir hören es an den Laufgeräuschen des Lüfters: durch Wärme, die fortwährend abgeführt werden muss. Die großen Rechenzentren und Serverstationen haben genau dieses Problem, die Abfuhr der Wärme, die den ordnenden Prozessen in ihren Geräten auf dem Fuße folgt.

Bei einer chemischen Reaktion gibt es eine weitere Möglichkeit, das Problem der Entropieerhöhung zu lösen. Jedes Mal, wenn zwei Moleküle reagieren, entsteht Ordnung. Reagiert ein großes Molekül mit einem kleineren, kann sich das große Molekül mit dem kleineren verbinden, indem es selbst einen Teil von sich abspaltet. Hierbei muss die Abspaltung zu einer etwas höheren Entropie führen, als durch die Reaktion mit dem kleinen Molekül an Entropie verringert wird. Gleichzeitig kann zusätzlich Wärme abgegeben werden.

Die Beispiele zeigen, dass in der organischen Chemie mit dem Aufbau komplexerer Moleküle ein Vorgang stattfindet, der gegen das Entropieprinzip verstößt. Es kann nur umgangen werden, indem Wärme abgegeben wird (Abb. 3.2) oder an anderer Stelle gebildete größere Moleküle in kleinere zerlegt werden. Und zumindest für die Wärmeabgabe ist eine vorgeschaltete Energiequelle erforderlich. Am Anfang der Lebensentwicklung



**Abb. 3.2** Die Erzeugung biologischer Ordnung in einer Zelle erfolgt durch spontane Wärmeabgabe an die Umgebung

stand überwiegend chemische Energie, Wärmeenergie oder potentielle Energie zur Verfügung. Erst später bildeten sich biologische Zellen, die Energie aus bereits vorhandenen organischen Molekülen bzw. aus dem Sonnenlicht beziehen konnten (Konsumenten bzw. Produzenten). Letztendlich dreht sich in einem Lebewesen alles nur um Entropie. Alle biochemischen Reaktionen bewirken in der Summe, dass eine Entropieerhöhung in der Umgebung und eine Entropieabnahme in den Zellen vollzogen werden. Wir benötigen Nahrung, weil sie uns die erforderliche Energie für die Entropieerhöhung in Form der Wärmeabgabe liefert. Nur dadurch finden die Reaktionen der Moleküle miteinander in unserem Körper statt. Ist die Umgebungstemperatur zu hoch, können die Zellen keine Wärme mehr abgeben. Die Folge ist das Ausbleiben der Entropieerhöhung und somit der Molekülreaktionen. Das System Zelle stirbt. Den Prozess des Lebens zu beginnen heißt somit, den Kampf gegen die Entropie aufzunehmen.

Wir sehen aus unserer heutigen Sicht als Wärme abgebende Lebewesen tatsächlich, dass die Gesetzmäßigkeiten der Entropie auf dem Weg zum Leben eingehalten wurden – eine der wesentlichen Voraussetzungen für unsere Existenz. Auch die anderen beschriebenen Parameter wie Konzentration der Moleküle, katalysatorgestützte Reaktionsgeschwindigkeiten oder Zu- und Abfuhr von Komponenten waren jeder für sich von entscheidender Bedeutung und trugen im notwendigen Verhältnis zur Entwicklung bei. Um ein Verständnis für die Entstehung des Lebens zu bekommen, müssen all diese Faktoren in ihrem Zusammenspiel verstanden werden. Und dabei taucht eine weitere Besonderheit der organischen Chemie auf: Es geht um die Händigkeit, die Orientierung der Moleküle im Verhältnis zu einem Bezugssystem. Auf den ersten Blick erscheint sie als ein

zweitrangiges Phänomen, aber bei genauer Betrachtung wird ihre Bedeutung schnell klar. Zwei Aminosäuremoleküle können zum Beispiel bei gleicher Zusammensetzung zwei verschiedene Strukturen besitzen und dadurch jeweils unterschiedliche Eigenschaften in komplexen organischen Molekülen hervorrufen. Sie werden als chiral bezeichnet. Innerhalb dieser Moleküle befinden sich gleiche Bausteine an unterschiedlichen Stellen.

### 3.6 Chiralität – was ist das denn?

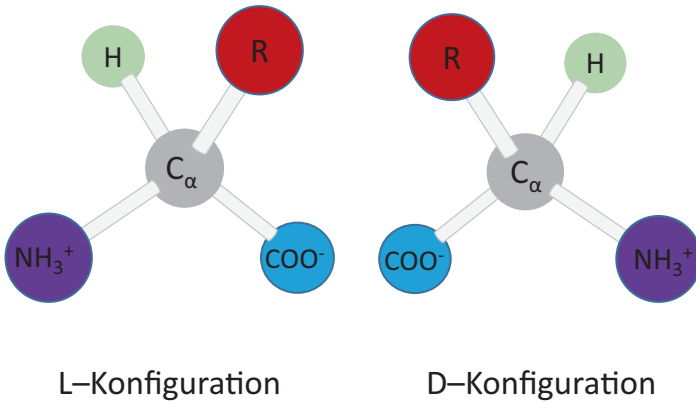
Es ist eine der großen Fragen in der Diskussion um die Entstehung des Lebens. Sie betrifft die Besonderheit der unterschiedlichen Struktur zweier chemisch gleicher Moleküle. Gemeint ist die Händigkeit bestimmter organischer Moleküle, die von einem definierten Blickpunkt aus betrachtet unterschiedlich ist, wie die der linken und der rechten Hand. Derartige Moleküle werden als chiral bezeichnet (Abb. 3.3). Die Ermittlung der Händigkeit dient dazu, chemisch gleiche Moleküle mit Variationen in der Struktur vergleichen zu können. Die Strukturen verhalten sich wie Bild zu Spiegelbild. Festgelegt werden die Händigkeiten anhand der Orientierung bestimmter Atome in Bezug auf das zentrale Kohlenstoffatom. Durch die chemische Evolution wurden bereits in der frühesten Phase bestimmte Strukturen in der Ausbildung komplexer Moleküle bevorzugt. In der Chemie gibt es aus der Historie heraus verschiedene Zugänge, die Struktur der Händigkeit zu definieren. Bekannt sind die links- oder rechtsdrehenden Milchsäuren. Auch für Aminosäuren und Zucker gibt es entsprechende Angaben. Hintergrund für diese Aussagen ist, dass zu Beginn der Forschung in diesem Gebiet die Händigkeit eines Moleküls anhand der Drehung durchgeleiteten, polarisierten Lichts bestimmt wurde. Es weist



zum Beispiel bei einem Molekül nach links, bei dem spiegelbildlich gleichen nach rechts. So finden sich in der Literatur für Aminosäuren oder auch Zucker Kennzeichnungen mit dem Buchstaben L für links (lat. laevus, links) und D für rechts (lat. dexter, rechts). Bemerkenswert ist, dass bei einer Herstellung der Moleküle im Labor die Varianten D und L immer gleich häufig auftreten, bei der Bildung durch biologische Prozesse aber immer eine davon (L oder D) dominiert. So liegen die Aminosäuren in biologischen Zellen bis auf wenige Ausnahmen in der L-Form und der Zucker in der DNA (Desoxyribose) bzw. der RNA (Ribose) immer in der D-Form vor.

Es gibt aber auch Moleküle, die nur eine Strukturform besitzen. Sie sind achiral. Die in biologischen Zellen vorkommenden Aminosäuren sind bis auf eine Ausnahme alle chiral. Nur Glycin, die am einfachsten aufgebaute Aminosäure ist achiral. Diese Ausnahme hat mich bislang davor bewahrt, dass mir meine Kollegen nicht gleich das Totschlagargument der großen Zahlen in den Variationsmöglichkeiten vorgeworfen haben. Aber dazu weiter unten mehr, wenn es um die Bildung von Peptiden geht (Abschn. 8.3).

Was heißt chiral genau? Es bedeutet, dass zwei chemisch identische Moleküle (oder Produkte) unterschiedliche Formen haben, die sich nicht miteinander zur Deckung bringen lassen. Als Vergleich werden häufig die Hände (daher die Händigkeit) herangezogen. Wenn wir in ihre Innenseite schauen und sie mit dieser Ausrichtung übereinanderlegen, befindet sich der Daumen der einen Hand auf der linken und derjenige der anderen Hand auf der rechten Seite. Genauso verhält es sich mit der Drehrichtung von Korkenziehern für Links- und Rechtshänder oder mit links- und rechtsdrehenden Schneckengehäusen. Wir können aber auch die Füße betrachten (Abb. 3.4a), womit wir gleichzeitig ein Gegenbeispiel, die Socken,



**Abb. 3.3** Darstellung der L- und D-Konfiguration einer chiralen Aminosäure. Die beiden Moleküle lassen sich durch Übereinanderlegen nicht in Deckung bringen.  $C_\alpha$  = zentrales Kohlenstoffatom, H = Wasserstoff,  $NH_3^+$  = protonierte Aminogruppe,  $COO^-$  = deprotonierte Carboxygruppe, R = variable Seitenkette

anführen können. Socken (ungetragen) sind achiral (Abb. 3.4b).

Warum ist die Bevorzugung einer bestimmten Molekülstruktur so eine wichtige Fragestellung? Werden Aminosäuren abiotisch, durch nichtbiologische Prozesse, gebildet, entstehen immer zu gleichen Teilen die L- und D-Spezies (sogenannte Enantiomere), unabhängig davon, in welchem Umfeld sie entstehen. Es bildet sich ein sogenanntes Racemat, eine 1:1-Mischung beider Spezies. Das bemerkenswerte daran ist, dass die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Moleküle, egal ob sie der L- oder D-Form angehören, völlig gleich sind. Biologisch dagegen sind sie sehr verschieden, da es beim Einbau der Enantiomere in größere Moleküle sehr genau auf die Struktur ankommt. Es ist wie bei dem Einbau einer Wendeltreppe, deren Teilstücke immer die gleiche



**Abb. 3.4** a Beispiel chirale Struktur der Füße, b Socken sind achiral

Drehung aufweisen sollten, in ein Haus mit mehreren Stockwerken. Wird ein Teilstück falsch, also in die entgegengesetzte Richtung gedreht, geliefert, lässt sich die Treppe nicht mehr wie vorgesehen in dem Treppenhaus einbauen. Welchen Einfluss die Struktur bei gleicher chemischer Zusammensetzung hat, zeigt das Schmerzmittel Contergan. Während die Substanz in der einen Form ein gefahrloses Beruhigungsmittel ist, führt die andere bei Einnahme während der Schwangerschaft zu schweren Fehlbildungen der Gliedmaßen bei den Nachkommen.

Jeder, der in die Diskussion um die Entstehung des Lebens einsteigt, wird nach dem zweiten Satz mit der Frage konfrontiert, wie es sich denn mit der Chiralität verhält. So war es auch in allen Diskussionsrunden, in denen wir uns zusammengefunden hatten. Von Anfang an wurde ein Teil der geistigen Kapazitäten für dieses Thema verbraucht. Welche Mechanismen haben bei gleichem Mengenangebot und gleichem chemischen Verhalten der Moleküle dazu geführt, dass sich jeweils nur eine Konfiguration durchsetzte? [3]. Die Ursachen und der Zeitpunkt der Festlegung auf die entsprechende Form sind bislang unbekannt. Eine der jüngsten Entdeckungen

ist der Einfluss von zirkular polarisiertem Licht im Welt-  
raum auf das Gleichgewicht von L- und D-Aminosäuren,  
die in Meteoriten vorkommen. Das Verhältnis ist deut-  
lich zugunsten der L-Spezies verschoben [4]. Sollte dies  
die Ursache für die heute dominanten L-Aminosäuren  
auf der Erde sein, müsste vorausgesetzt werden, dass am  
Anfang ein wesentlicher Anteil organischer Moleküle  
aus dem Weltall als Ausgangsstoff für die Zellbildung zur  
Verfügung stand. Aber es gibt auch eine recht einfache  
Lösung, die in Kap. 8 vorgestellt wird.

Das Phänomen der Chiralität bekommt dann Bedeu-  
tung, wenn es um die Anreicherung und Auswahl der  
ersten Moleküle für die Zellentwicklung geht. Es tre-  
ten immer beide Konfigurationen der Moleküle in Kon-  
kurrenz zueinander auf. Es muss daher ein Mechanismus  
identifiziert werden, der die eine Richtung bevorzugte.  
Die Festlegung auf eine Händigkeit bei Aminosäuren  
ist dann entscheidend, wenn es um die Bildung größe-  
rer Moleküle wie Proteine und Enzyme geht. Obwohl  
die chemischen Eigenschaften der beiden verschieden  
orientierten Aminosäuren identisch sind, können die-  
jenigen mit der D-Konfiguration in einer Welt aus lau-  
ter L-Aminosäuren nicht viel bewirken. Eine wahllose  
Verbindung von linkshändigen und rechtshändigen  
Aminosäuren führt zu einer ungeordneten Kette, die  
andere Eigenschaften aufweist als Ketten mit durch-  
gehend nur einer Händigkeit der Aminosäuren. Wenn  
die Ketten ausschließlich aus der D- oder der L-Version  
bestehen, kommt es schneller zur Faltung. Die wiederum  
führt zu stabileren Strukturen und bewirkt so eine län-  
gere Lebensdauer des Moleküls. Die Festlegung auf nur  
eine Händigkeit in allen von LUCA ausgehenden Zel-  
len ist ein Hinweis auf die besondere Bedeutung längerer  
Aminosäureketten. Sie haben vermutlich von Beginn an  
eine entscheidende Rolle gespielt. Die Einnahme einer

dreidimensionalen Struktur war die Voraussetzung für die Entwicklung spezifischer katalytischer Funktionen, die, wie später gezeigt wird, entscheidende Unterstützung bei der Bildung komplexer Moleküle geliefert haben [5].

## Literatur

1. Pasek MA (2017) Schreibersite on the early Earth: scenarios for prebiotic phosphorylation. *Geosci Front* 8(2):329–335
2. Benner SA (2014) Paradoxes in the origin of life. *Orig Life Evol Biosph* 44:339
3. Meierhenrich U (2008) Amino acids and the asymmetry of life. Springer, Berlin
4. Sugahara H, Meinert C, Nahon L, Jones NC (2018) D-amino acids in molecular evolution in space – absolute asymmetric photolysis and synthesis of amino acids by circularly polarized light. *BBA Proteins and Proteomics* 1866(7):743–758
5. Englander SW, Mayne L, Kan Z-Y, Hu W (2016) Protein folding – how and why: by hydrogen exchange, fragment separation, and mass spectrometry. *Annu Rev Biophys* 45:135–152



# 4

## Wirklich hilfreich: Ein kurzer Abriss zu Abläufen in heutigen biologischen Zellen

### Inhaltsverzeichnis

4.1	Das Problem der Eingrenzung .....	71
4.2	Der Informationsspeicher, ohne Nullen und Einsen .....	79
4.3	Wie wird in der Zelle die gespeicherte Information umgesetzt? .....	85
	Literatur .....	94

### 4.1 Das Problem der Eingrenzung

Vom heutigen Standpunkt der Wissenschaft aus lässt sich die Entstehung der ersten selbstvermehrenden Zelle von zwei Seiten betrachten: vorwärts gewandt, von der Bildung der ersten organischen Moleküle bis zum Auftreten von LUCA aus, und rückwärts gewandt, ausgehend vom Wissen über die heutigen Zellen zu immer einfacheren Formen. Im zweiten Fall müssen die funktionalen

Bausteine auf ihre minimale Ausstattung reduziert werden, ohne dass die charakteristische Grundfunktion verloren geht. Der zweite Fall ist vergleichbar mit einer Großstadt, die mit den Jahrhunderten gewachsen ist und deren ursprünglicher Ortskern gesucht wird. Schon dieser kleine Kern hatte grundlegende Strukturen wie Energie- und Wasserversorgung, Material- und Informationsfluss. Alles wurde ständig weiterentwickelt und hielt den größer werdenden Stadtkomplex funktionsfähig zusammen. Die Bausteine in den heutigen Zellen, jeder für sich, haben Milliarden Jahre lange Entwicklungen hinter sich, mit ständigen Veränderungen, Zuwächsen und Anpassungen. Den funktionalen Kern der „Molekülgrößtädte“ zu entdecken ist mit viel Aufwand verbunden. Aber es kann sich lohnen, wenn hierdurch eine Brücke zur anderen Seite, der vorwärts gewandten, geschlagen werden kann. Um dies deutlich machen zu können, sind im Folgenden die wichtigsten Punkte über Bausteine und Reaktionsschritte in unseren Zellen zusammengestellt.

Es ist nicht einfach, die Prozesse zu verstehen, die in unseren Zellen zum Erhalt von sich selbst so präzise ablaufen, dass sie über einen Zeitraum von mehr als 3,5 Mrd. Jahren überlebt haben. Diese Präzision erfordert so viele Reaktionsschritte, dass die Grundlagen, die zur ersten sich selbst vermehrenden Zelle führten, völlig überdeckt sind. Es ist, als wollten wir aus der Technik eines der modernsten Flugzeuge auf die Entstehungsgeschichte der Steinaxt schließen. Trotzdem müssen wir bei allen Überlegungen zum Ursprung des Lebens verstehen, welche Abläufe heute in unseren Zellen stattfinden. Sie bilden das eine Ende der Entwicklungslinie. Für das andere Ende, den Anfang, ist es hilfreich, Vereinfachungen vorzunehmen oder sogar Vorgänge aus unserer technischen Welt zum Vergleich heranzuziehen.

Werden die Vorgänge in lebenden Körpern betrachtet, tut sich eine extrem komplizierte, auf das Feinste

abgestimmte Welt chemischer und physikochemischer Prozesse auf, die noch weit davon entfernt ist in ihrer Gesamtheit aufgeschlüsselt zu werden. Nur wenige Spezialisten sind in der Lage, einzelne Schritte in der Vielfalt der Reaktionen zu verstehen. Dennoch lassen sich Grundprinzipien mit Modellen aus der uns vertrauten technischen Welt erkennen. Alles, was in einer Zelle an Reaktionsschritten abläuft, ist eingebunden in zwangsläufig aufeinander folgende Reaktionen, die jeweils die nächsten Schritte vorgeben. Als Vergleich kann ein Spielzeug dienen, bei dem eine Kugel an der höchsten Stelle einer Rollbahn eingesetzt wird und die vorgegebene Bahn in zahlreichen Windungen durchläuft. Hierbei stößt sie andere Kugeln an, die wiederum zur Seite in eigene Bahnen rollen und dort weitere Kugeln mit jeweils zugehörigen Rohrleitungen, Kanälen oder Rinnen in Gang setzen. Unterwegs werden Schalter und Mechanismen passiert, die spezielle Funktionen starten. Das Ganze wird jeweils beendet, wenn die Kugeln ihr tiefstes Niveau erreicht haben. An dieser Stelle ist Energie von außen nötig, um sie wieder in ihre Ausgangsposition zu bringen. Jede Aktion an einer der Kontaktstellen oder Schalter kann nur dann stattfinden, wenn vorher genau die Abfolge der Kugelbewegungen erfolgt ist, die zur weiteren Reaktion notwendig ist. Was in dem komplizierten Spielkasten mechanisch abläuft, erfolgt in der Zelle nacheinander durch chemische Reaktionen. Fällt eine Reaktion aus – das würde dem Verklemmen einer Kugel auf ihrem Weg nach unten entsprechen –, bricht die Folge ab und das System stirbt. Es sei denn, es greifen aufwendige Sicherungssysteme zum Erhalt, so, wie sie im Zuge der Evolution immer komplexer ausgestaltet wurden. Was wir heute sehen, ist in Anlehnung an dieses Rollbahnmodell eine unendliche Anzahl verzweigter Bahnen, auf denen ständig Bewegung durch rollende Kugeln stattfindet. Die

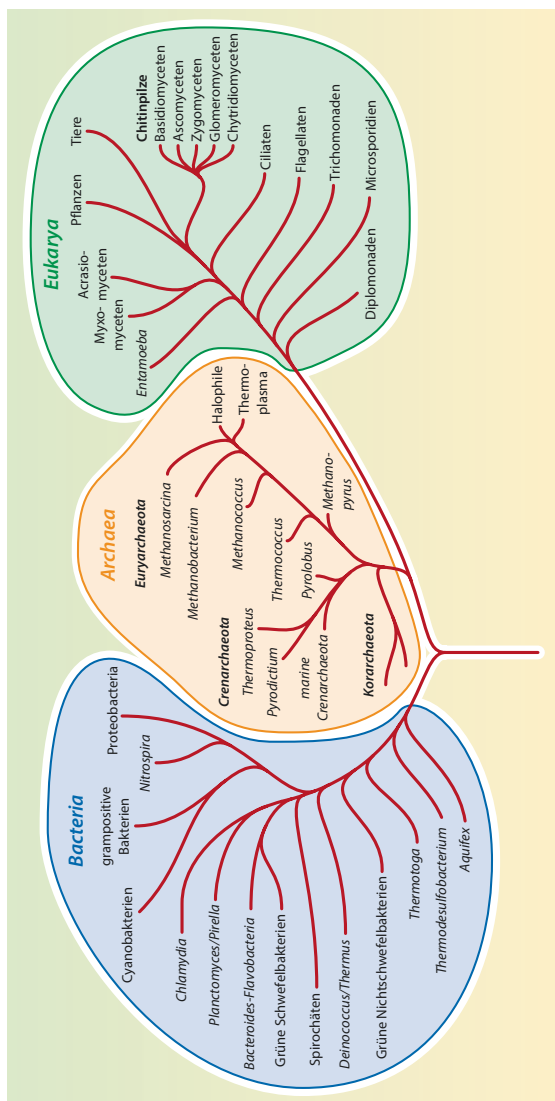


Energie, die notwendig ist, um die Kugeln immer wieder in ihre höchsten Positionen zu bekommen, wird durch gezielte Aufnahme von außen in Form von Nahrung oder wie bei den Pflanzen durch Sonnenenergie gedeckt.

Aus der heutigen Anzahl an Rollbahnen und deren Abhängigkeiten zueinander auf die Anfänge dieses System zu schließen, ist bisher nicht gelungen und erscheint fast unmöglich. Gesucht wird die erste Bahn mit der ersten Kugel, nach der sich alle weiteren Bahnen entwickelten. Hierbei muss es nicht in Zahlen zu beziffernde Versuche gegeben haben, diese erste Bahn mit immer neuen Varianten zu kombinieren. Nur die einzelne Kombination, die eine Fortschreibung des Prinzips oder vielleicht sogar eine Verbesserung ermöglichte, blieb erhalten. Alle anderen Ansätze wurden zwangsläufig abgebrochen.

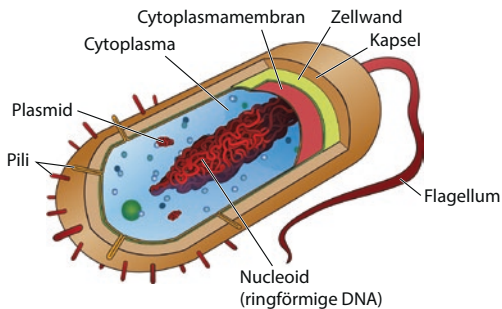
Von dieser ersten Bahn zu dem zu kommen, was wir heute als die Frühphase der drei Entwicklungslinien des Lebens erkennen können, war es noch ein großer Schritt, der sich durch eine tiefe Dunkelheit auszeichnet. Bereits die ältesten identifizierbaren Vertreter dieser Linien waren in ihrer Entwicklung schon so weit voneinander entfernt, dass aus der Kenntnis ihrer Eigenschaften nur wenig auf den allen gemeinsamen Vorfahren LUCA geschlossen werden kann. Immerhin ist es aber möglich, das Genom verschiedenster Prokaryoten, welches für die Bildung von Proteinen genutzt wird, zu vergleichen. Hieraus lässt sich ein Pfad erkennen, der auf die Grundausrüstung von LUCA hinweist [1]. Die Daten stützen die Theorie, dass das Leben in einer hydrothermalen Umgebung begonnen hat. Aber dazu mehr in Abschn. 8.8.

Um welche Entwicklungslinien des Lebens handelt es sich? Die heutigen Zellen lassen sich in drei Domänen einteilen, die zu zwei Gruppen gehören (Abb. 4.1). Die erste Gruppe bilden die Prokaryoten mit den zwei Domänen Bakteria und Archaea. Sie sind dadurch gekennzeichnet,

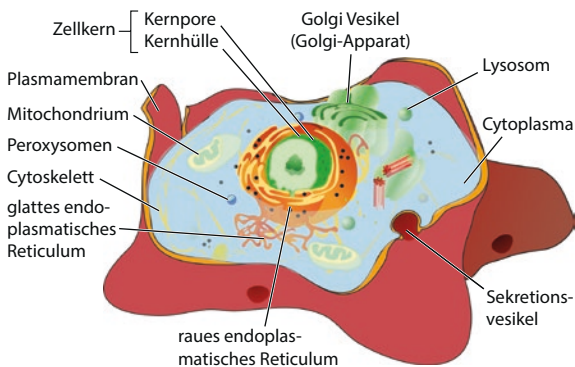


**Abb. 4.1** Die drei Domänen des Lebens. (© Springer-Verlag GmbH [3])

dass ihre Erbinformation (DNA) relativ einfach strukturiert ist und nicht durch eine zusätzliche Membran separat abgegrenzt als Zellkern in der Zelle vorliegt (Abb. 4.2). Zur zweiten Gruppe gehören die Eukaryoten, die gleichzeitig die dritte Domäne bilden. Ihr deutlichstes Kennzeichen gegenüber den Prokaryoten ist die Ausbildung eines Zellkerns, in dem die DNA eingelagert ist (Abb. 4.3) [2]. Die Eukaryoten sind aus den Prokaryoten



**Abb. 4.2** Aufbau eines prokaryotischen Einzellers. (© Springer-Verlag GmbH [3])



**Abb. 4.3** Eukaryotische Zelle (Tierzelle). (© Springer-Verlag GmbH [3])

hervorgegangen und spielen daher für die Diskussion um die Entstehung des Lebens keine Rolle. LUCA hatte noch keinen Zellkern, er war ein Prokaryot. Prokaryotische Zellen haben eine erstaunliche Verbreitung erfahren. Sie kommen zum Teil an extremen Standorten vor, an denen fast alle eukaryotischen Zellen keine Überlebenschance haben. Sie existieren in heißen Quellen weit über 100 °C, bei niedrigen pH-Werten, in extrem salzreichen Wässern und bei Drücken von über 1100 bar, wie sie in 11.000 m tiefen Gräben an den tiefsten Stellen der Ozeane auftreten. Darüber hinaus wurden Prokaryoten in der Erdkruste in 4 km Tiefe gefunden. Die Unzugänglichkeit der Standorte ist ein Grund dafür, dass schätzungsweise weniger als 1 % von ihnen bekannt sind. Die Anpassungsfähigkeit lässt Rückschlüsse auf die Ausstattung ihrer ersten Vorfahren und deren mögliche Umgebungsbedingungen zu. Sie bilden daher ein wichtiges Indiz für einige der weiter unten vorgestellten Hypothesen zur Entstehung des Lebens.

Bei der Erforschung der Entwicklungsschritte zur ersten Zelle kam schnell die Frage auf, ab welcher minimalen Molekülausstattung eine geschlossene biologische Hülle in der Lage ist, sich selbst zu vermehren. Aus der Kenntnis der Prozessabläufe in den heutigen Zellen lassen sich die im Folgenden beschriebenen Bausteine hierfür definieren.

Die erste Zelle muss neben einer speziell mit Enzymen ausgestatteten Membran als Zellhülle einen Informationsträger gehabt haben (vergleichbar mit der heutigen RNA oder DNA oder mit Vorläufermolekülen hiervon). Weiterhin brauchte es eine Art Lesegerät, mit dem die Information abgelesen und in verschiedene molekulare Werkzeuge umgesetzt werden konnte. Heute ist es das Ribosom, ein großes Funktionsmolekül, das bei Prokaryoten aus

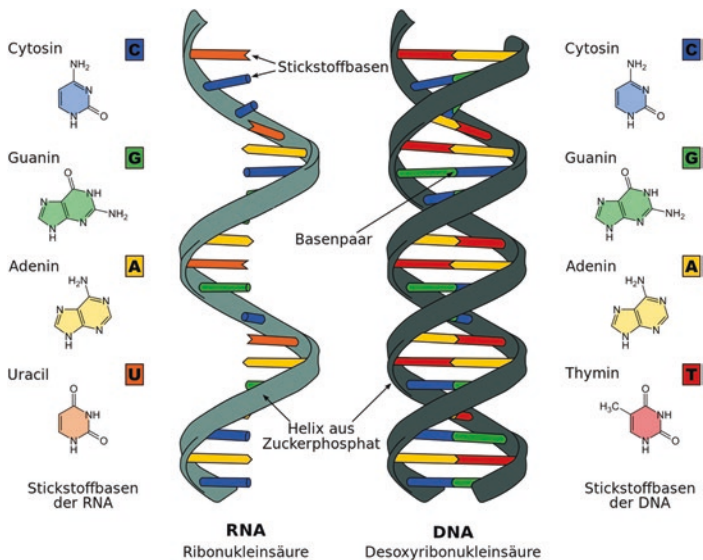
32 Proteinen und 3 RNAs besteht. Es organisiert die Verknüpfung der Aminosäuren zu Peptiden mit Hilfe eines Bauplans der DNA, der über eine Boten-RNA (mRNA) geliefert wird. Darüber hinaus waren komplexe Molekülverbindungen notwendig, die Hilfestellungen bei der Molekülsynthese sowie bei der Speicherung der Information gaben. Alle Informationen über die Bausteine mussten im Informationsträger gespeichert sein und gleichzeitig kopiert werden können. Hierdurch war die Möglichkeit gegeben, dass bei einer Zellteilung eine Verdopplung des Erbguts stattfand.

Die Zelle, die mit der entsprechenden Ausstattung den ersten entscheidenden Schritt zur Vermehrung vollzog, hatte allerdings molekulare Werkzeuge, die wesentlich einfacher aufgebaut waren, als sie es heute sind. Die heutige Komplexität ist der Exaktheit geschuldet, mit der die gespeicherten Informationen aus der DNA in Moleküle wie RNA und Proteine umgesetzt werden müssen. Es ist leicht verständlich, dass eine Zelle, deren Ursprung vor über 3,5 Mrd. Jahren anzunehmen ist, heute nicht mehr so einfach aufgebaut ist, wie sie es am Anfang war. Hierfür war der fortwährende Selektionsdruck durch sich ständig ändernde Umweltbedingungen zu groß. Auch wenn die heutigen molekularen Abläufe in den Zellen fehleranfällig sind, sodass sich im Zuge der Evolution ausgefeilte Reparaturmechanismen hierfür herausgebildet haben, ist die Exaktheit der Abläufe nicht mit denen der ersten Zelle, die sich teilen konnte, vergleichbar. Vielleicht waren viele Zellteilungen notwendig, bis eine der Kopien wieder in der Lage war, eine überlebensfähige Version durch Teilung herzustellen. Die anderen starben ab. Bei den Versuchen, die letztlich zum Erfolg führten, war das Vorhandensein eines belastbaren Informationsspeichers die alles entscheidende Größe.

## 4.2 Der Informationsspeicher, ohne Nullen und Einsen

Die erste Informationsspeicherung, die aus der chemischen Evolution hervorgegangen ist, wird in der RNA vermutet (engl. „Ribonucleic acid“, dt. Ribonukleinsäure [RNS]). Sie besteht aus einem Kettengerüst aus Zucker (Ribose) und Phosphat, mit dem in variierender Reihenfolge organische Basen verknüpft sind. Es sind Adenin, Cytosin, Guanin und Uracil. Die heutigen Zellen nutzen statt der RNA die DNA als Informationsspeicher (engl. „Desoxyribonucleic acid“, dt. Desoxyribonukleinsäure [DNS]). Sie ist eine verdrehte, strickleiterähnliche Molekülkette, deren Sprossen in zwei Teile geteilt sind. Die beiden Teile stehen nicht sonderlich fest miteinander in Verbindung, sie können durch höhere Temperaturen (85 °C) oder durch Zugabe von Alkalien leicht getrennt werden. Die DNA besteht ebenfalls aus vier organischen Basen, von denen Adenin, Cytosin, Guanin mit der RNA identisch sind. An die Stelle von Uracil tritt Thymin, das etwas anders aufgebaut ist als ihr Stellvertreter in der RNA. Die Basen der DNA sind in variierender Reihenfolge auf beiden Seiten der Molekülleiter fast identisch zur RNA an ein Gerüst aus Zucker (hier Desoxyribose) und Phosphatmolekülen angeordnet. Es passen immer nur Adenin (A) und Thymin (T) beziehungsweise Guanin (G) und Cytosin (C) zusammen in eine Sprosse der Leiter. Wenn wir die DNA der Länge nach in der Mitte teilen, ergibt sich für jede Seite ein Molekül, das der RNA sehr ähnlich ist. Die RNA hat die zwei beschriebenen Unterschiede zur DNA: Neben dem bereits erwähnten Austausch des Thymins gegen Uracil liegt auch am Zucker eine Veränderung vor. Die Desoxyribose ist durch die Ribose ersetzt, die fast gleich aufgebaut ist, aber ein Sauerstoffmolekül mehr

besitzt (Abb. 4.4). Im Vergleich von DNA und RNA ist die Letztere durch den etwas veränderten Zucker deutlich instabiler und deshalb für eine dauerhafte Informationsspeicherung unter den Bedingungen, wie sie in einer Zelle herrschen, nicht besonders geeignet. Trotzdem konnte sie die zu Beginn notwendigen Speicheraufgaben übernehmen – für eine Zelle, die nur eine kurze Lebensdauer hatte. Für die Annahme, dass die Entwicklung der RNA zeitlich vor derjenigen der DNA lag, gibt es verschiedene Hinweise. Die Moleküle, aus denen die DNA zusammengebaut wird, werden heute in der Zelle aus Bausteinen der RNA gebildet. Es ist daher wahrscheinlich, dass auch in der Frühphase der Entwicklung die ersten Zellen in der Lage sein mussten, zuerst RNA aufzubauen, um anschließend DNA herstellen zu können.



**Abb. 4.4** Unterschiede zwischen RNA und DNA. ( © MesserWo-land/Wikipedia/CC BY-SA 3.0)

Der strukturelle Aufbau der DNA ist seit 1953 bekannt. Röntgenstrukturaufnahmen von Rosalind Franklin, die von dem US-Amerikaner James Watson und dem Briten Francis Crick als Grundlage für ihr Doppelhelixmodell verwendet wurden, brachten den Durchbruch im Verständnis zur genetischen Informationsspeicherung [4]. Hierdurch wurden gleichzeitig die Unterschiede von RNA und DNA deutlich. Das vermutlich spätere Auftreten der DNA in einem fortgeschrittenen Entwicklungsschritt der Evolution führte nicht dazu, dass die „Erfindung“ RNA aufgegeben wurde. Im Gegenteil: Sie wurde weiterhin in vielfältiger Weise eingesetzt, dort, wo eine kurze Überlebenszeit nicht nachteilig, sondern teilweise sogar von Vorteil war. So werden in den heutigen Zellen ständig unterschiedliche RNA-Typen mit spezifischen Codierungen benötigt und hergestellt. Nach dem Einsatz werden sie wieder zerteilt und recycelt. Es gibt zum Beispiel eine RNA, die direkt Informationen aus der DNA kopiert und mit zu einem Einsatzort nimmt (Boten- oder Messenger-RNA [mRNA]), oder eine speziell dreidimensional strukturierte RNA, die nur die eine Aufgabe hat, eine Aminosäure von einem Beladungsmolekül zu einem Verarbeitungsmolekül zu bringen (Transport-RNA [tRNA]). Inzwischen konnten mehr als zehn weitere RNA-Typen unterschieden werden.

Es stellt sich die Frage, was eigentlich das besondere an der DNA als Datenspeicher ist, und gleichzeitig, wie eine chemische Datenspeicherung funktionieren kann. Physikalische Datenspeicherung kennen wir in komplexer Art und Weise spätestens seit der Erfindung der Computer. Eine inzwischen fast steinzeitlich anmutende Form war zu Beginn der Entwicklung die Lochkarte. Das Speichermedium Lochkarte ließ an einigen Stellen, die gelocht waren, Licht hindurch, das von einem geeigneten Lesegerät in einen Stromfluss umgewandelt wurde. Einfache



Texte oder Zahlenfolgen benötigten ganze Schuhkartons voller Lochkarten für kleinere Operationen.

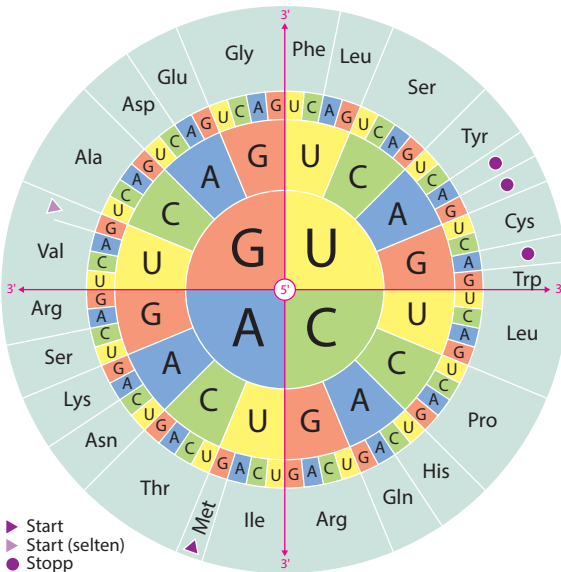
Mit der Computertechnik entstand die Möglichkeit, Zahlenkolonnen, Bilder oder Texte über ein System von zwei Zahlen, der Null und der Eins, abzuspeichern. Für dieses binäre System musste nur definiert werden, welche Anzahl und welche Reihenfolge von Nullen und Einsen einer Zahl, einem Buchstaben oder einem Symbol entsprechen. So kann zum Beispiel ein „A“ als 1000001, ein „B“ als 1000010 und ein „C“ als 1000011 festgelegt werden. Die Definition allein reicht natürlich nicht aus. Erst ein System von Schaltern, das in der Lage ist, den Wechsel zwischen zwei Zuständen abzubilden, kann Rechenoperationen oder eine Datenspeicherung durchführen. Die häufigste Form ist das Anlegen einer Spannung für die 1 im Wechsel mit dem Zustand 0, bei dem keine Spannung angelegt ist.

Die Natur ist uns in diesem Fall einen großen Schritt voraus. Sie nutzt seit mehr als 3,5 Mrd. Jahren überaus erfolgreich ein System, das durch Verwendung von mehr als zwei Variablen aufgebaut ist. Die Informationsspeicherung in der DNA erfolgt durch die vier Basen Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin, kurz A, C, G und T. Mit vier Buchstaben ist eine größere Variationsmöglichkeit gegeben und somit die Datendichte wesentlich höher als mit nur zwei Buchstaben bzw. zwei Zahlen. Um die Situation etwas verständlicher zu beschreiben, können die Basen der DNA mit den Zahlen 1 bis 4 gleichgesetzt werden. Bei den Basen gibt es nur zwei Paarungsmöglichkeiten, um die Stufen der Leiter zu vervollständigen. A verbindet sich nur mit T und C nur mit G. Übertragen auf die Zahlen von 1 bis 4 bedeutet dies, dass die Summe der beiden gegenüber liegenden Zahlen immer 5 ergeben muss. So kann nur die (Base) 1 mit der (Base) 4 eine Sprosse bilden und entsprechend 2 nur mit der 3. Aus

den vier Zahlen lässt sich ein komplexes Informationssystem aufbauen, das folgendermaßen hätte aussehen können: Die Aminosäuren würden in den Zellen in einer von einem Code vorgegebenen Reihenfolge miteinander verknüpft, um Proteine zu bilden. Der Code, der entscheidend für den Platz der jeweiligen Aminosäure in den Peptiden ist, muss unverwechselbar sein und garantieren, dass kein anderes Molekül in die Kette eingebaut wird. Er könnte mit den Zahlen 1 bis 4 für eine Aminosäure vierstellig sein, sodass maximal 256 ( $4^4$ ) Aminosäuren in unseren Zellen Verwendung finden würden. Das war für die Entstehung des Lebens wohl zu viel des Guten an Komplexität, zumal eine derart hohe Anzahl an Aminosäuren zu Beginn sicher nicht verfügbar war. Nein, es ging auch anders und immer noch komplexer als das binäre System der Computer.

Die Evolution hat sich auf nur drei Variablen aus den vier Zahlen eingelassen. Das heißt, es gibt bei Variation aller Möglichkeiten (z. B. 213, 341, 223 etc.) maximal 64 ( $4^3$ ) eindeutige Zuordnungen mit drei Zahlen aus dem Pool der vier verwendbaren Zahlen (bezogen auf die Basen gehören zu einem Code immer drei Basen als Basentriplett [Codon] aus den vier möglichen). Letztlich ließen sich mit dieser Zahlenkombination 64 unterschiedliche Aminosäuren im Zellsystem verwenden. Aber auch diese Größenordnung war anscheinend noch zu hoch. Das System Zelle funktionierte am Anfang bereits mit weniger als den rezent verwendeten 20 Aminosäuren.

In heutigen Zellen sind neben den 20 Kombinationen für Aminosäuren (kanonische, heute verwendete Aminosäuren) vier Codierungen für Start- und Stoppfunktionen belegt (Abb. 4.5). Der Start wird zum Beispiel immer mit der Aminosäure Methionin begonnen. Für das Ende des Ableseprozesses stehen dagegen drei verschiedene Aminosäuren zur Verfügung, die eine Stoppfunktion besitzen. Es



**Abb. 4.5** Zuordnung des genetischen Codes aus den Basen-tripletts (Codons) der mRNA zu den kanonischen Aminosäuren (mit den Basen Adenin, Uracil, Guanin, Cytosin, von innen nach außen gelesen). Die Aminosäuren Serin (Ser), Leucin (Leu) und Arginin (Arg) besitzen sechs unterschiedliche Codons, Tryptophan (Trp) und Methionin (Met) nur jeweils ein Codon. Die C-Atome des Zuckers sind im Uhrzeigersinn von 1' bis 5' durchnummeriert, beginnend mit 1' an der Verknüpfung zur Base. In einem DNA oder RNA Strang kann somit die Ableserichtung der Basenfolge hieran orientiert werden, entweder von 5' nach 3' oder in umgekehrter Richtung. (© Springer-Verlag GmbH [3])

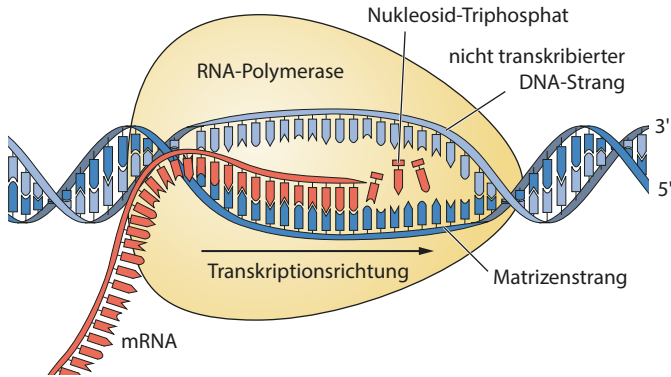
bleiben demnach von den 64 möglichen Kombinationen 40 weitere übrig, die 40 zusätzliche Aminosäuren hätten codieren können. Auch das wurde im Rahmen der Evolution nicht ausgenutzt. Stattdessen gibt es doppelte, vierfache und sogar sechsfache Belegungen verschiedener Codes für einzelne Aminosäuren, da die Zahlenkombination für 60 Fälle nicht mit 20 Aminosäuren ausgeschöpft werden kann. So gibt es für die Aminosäure

Leucin allein sechs verschiedene Code- Kombinationen (Code-Wörter), mit denen sie einer Kette zugeordnet werden kann. Zu jedem Basentriplett der mRNA gibt es ein Gegenstück, das Anticodon der tRNA. Es passen nur A und U bzw. G und C zusammen.

### 4.3 Wie wird in der Zelle die gespeicherte Information umgesetzt?

Der Vorgang der Informationsübernahme aus der DNA ist an komplexe Reaktionsschritte speziell angepasster Moleküle gebunden. Er spielt für die grundlegenden Entwicklungsschritte auf dem Weg zum Leben noch keine Rolle. Dennoch ist es hilfreich, die Grundlagen der heute stattfindenden Reaktionen zu betrachten, da sich hier Abläufe verstetigt haben und Moleküle verwendet werden, deren einfache Vorläufer die Basis für die späteren Prozesse bildeten.

Für das Ablesen der in der DNA gespeicherten Information wird diese kurzzeitig entdrillt und in der Länge aufgespalten, sodass ein Längsteil von ihr kopiert werden kann. Die Kopie erfolgt durch Anlagerung komplementärer RNA-Bausteine, der Nukleotiden, an dem einen Teilstrang der DNA (Abb. 4.6). Hierbei wird die Aufteilung in Dreierblöcke (Codons) genauso übernommen, wie sie von der DNA vorgegeben wird. Verständlich wird es wieder mit dem Vergleich mit einer Zahlenkombination. Eine Reihe von wechselnden Zahlen zwischen 1 bis 4 wird auf der gegenüber liegenden Seite so mit Zahlen ergänzt, dass die Summe immer 5 ergibt. Die gegenüber liegende Reihe entspricht der Boten-RNA (Messenger-RNA [mRNA]), die die Information zu einem molekularen Werkzeug



**Abb. 4.6** Ableseprozess einer teilentdrillten DNA (Translation). Erstellung einer Messenger-RNA (mRNA), die die Information durch sukzessive Anlagerung und nachfolgende Verknüpfung von Nukleotiden übernimmt. (© Springer-Verlag GmbH [3])

(Ribosom) transportiert, das die Peptidbildung generiert. Wenn wir die Basen betrachten, gibt es allerdings eine kleine Variation, da eine Base der DNA (Thymin [T]) eine etwas andere Zusammensetzung hat als ihr Pendant in der RNA (Uracil [U]). Aus der Position G der DNA wird C bei der RNA und umgekehrt. Aus A der DNA wird U der RNA und aus T der DNA (das durch Uracil U in der RNA ersetzt wird) wird A der RNA.

DNA: G C A T

RNA: C G U A

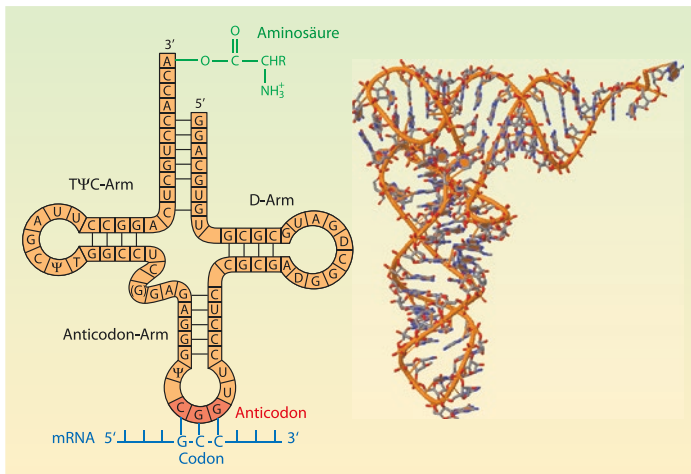
Die mRNA wandert zum Ribosom, dem molekularen Werkzeug zur Peptidbildung, durch das sie in einer bestimmten Schrittfolge durchgeleitet wird. Hierbei geschieht der wichtigste Vorgang in der Produktion der Enzyme und Proteine, der Werkzeuge und des Baumaterials der Zelle. Die mRNA stellt mit jedem Dreierblock

(Codon) aus den Basen eine Informationseinheit zur Verfügung, die genau für eine Aminosäure steht. Und jetzt passiert Folgendes: Das Ribosom lässt eine andere RNA, die Transport-RNA (tRNA) mit einer genau auf den Code abgestimmten Aminosäure auf dem Dreierblock Platz nehmen (Abb. 4.7). Die Transport-RNA ist das wichtigste Bauteil in dem ganzen Geschehen. An dem einen Ende trägt sie das Anticodon, den Code, und an dem anderen Ende die zugehörige Aminosäure (Abb. 4.8). Die Platznahme geschieht nur, wenn die Informationseinheit aus den drei Basen, dem Codon, genau zu dem Gegenstück, dem Anticodon der tRNA, passt. Das heißt in Zahlen mit der Bedingung, dass alle drei Summen wieder 5 ergeben: zu 214 passt 341, zu 444 passt 111 usw. Jede tRNA hat ihren eigenen Code und ihre eigene (spezifische) Aminosäure. Die Verbindung im Ribosom ist nur kurzzeitig. Sie dauert so lange, bis sich die Aminosäure von ihrem Transporter getrennt und mit der Aminosäure ihres Vorgängers verknüpft hat. So entsteht eine Kette, die durch fortwährendes Kombinieren von mRNA und tRNA gebildet wird.

Um es noch einmal aus einer anderen Sicht verständlich zu machen, lässt sich die Situation von der DNA beginnend anhand einer Zahlenkolonne darstellen. Die DNA gibt entdrillt die Reihe 311 421 131 als Code heraus. Daraus bildet die mRNA die Reihe 244 134 424 (Summe 5). In dem Ribosom wartet die mRNA auf die tRNA mit einer Aminosäure, die den Code 311 hat. Hat sie Platz genommen und die Aminosäure abgeladen, kommt die nächste tRNA mit dem Code 421 und danach die mit dem Code 131. Es wird deutlich, dass die Anticodons der tRNA genau mit dem Zahlencode der DNA übereinstimmen.

An dieser Stelle muss ich ein besonders großes Ausrufungszeichen setzen. Das Verständnis dieses Prozesses ist unbedingte Voraussetzung dafür zu erkennen, dass hierin





**Abb. 4.8** Transport-RNA (tRNA) in zwei- und dreidimensionaler Darstellung. An dem in der zweidimensionalen Darstellung nach oben überstehenden Strang (ACC) werden die Aminosäuren verknüpft. Diese „Anhängerkupplung“ wurde am Anfang der Lebensentwicklung herausselektiert und ist bis heute bei allen tRNAs gleich und für alle Aminosäuren nutzbar. Sie ist unspezifisch, sodass die erforderliche genaue Zuordnung der tRNAs zu den zugehörigen Synthetasen („Beladestationen“) über andere Erkennungsabschnitte an der tRNA erfolgt. Kennzeichen der tRNA sind Wechsel von Doppelstrangabschnitten mit Schleifenbildungen, in denen modifizierte Standardbasen vorkommen (TΨC-Arm, mit T für Thymin, Ψ für Pseudouridin und C für Cytidin; D-Arm mit der Base Dihydrouracil). Am Anticodon-Arm befindet sich das Basentriplett, die Informationseinheit als komplementäres Gegenstück (Anticodon) zum Codon der mRNA. (© Springer-Verlag GmbH [3])

Wenn wir uns in unserer technischen Welt umsehen, erkennen wir, dass viele Prozesse in ähnlicher Art und Weise ablaufen, wie es die Biochemie vorgibt. Fließbandproduktionen benötigen ein engmaschiges Informationssystem, das garantiert, dass immer zur richtigen Zeit an der richtigen Position genau das erforderliche Bauteil zur Verfügung steht. An einem Informationsträger wird abgelesen, welches Teil als Nächstes für den Zusammenbau



zum Beispiel eines Roboters erforderlich ist. Das Teil wird von einem passenden Transportwagen geliefert und auf das Band gelegt. Dort wird es sofort mit dem schon bestehenden Teil des Roboters verbaut. Der Transportwagen fährt zum erneuten Beladen zurück und steht nach kurzer Zeit wieder in der Reihe, um bei entsprechender Anforderung entladen zu werden.

Wie oben ausgeführt, wurden trotz der gegebenen 60 Möglichkeiten einer genauen Zuordnung von Codons aus 4 verschiedenen Basen im Lauf der Evolution für die meisten Fälle nur 20 Aminosäuren ausgewählt, die heute für die unendliche Vielfalt der Enzyme in einer Zelle stehen. Die von der mRNA übertragenen Information aus der DNA wird entsprechend für die Bildung von Ketten genutzt, in denen im Normalfall alle 20 Aminosäuren vorkommen. Ihre Anzahl variiert und kann in den Ketten der Peptide und Proteine in die Tausende gehen. Und hier lässt sich gleich erkennen, warum die Evolution bei „nur“ 20 Aminosäuren Halt gemacht hat, um Variationen in den Ketten für die Bildung von funktionsfähigen Proteinen auszuprobieren. Die Anzahl der unterschiedlichen Kombinationen von 20 Aminosäuren in einer Kette von 60 Einheiten ergibt bereits eine Größe, die der Anzahl der im Weltall vorkommenden Atome entspricht. Die Zahl der Variationsmöglichkeiten in einem Protein mit 1000 oder gar 10.000 Einheiten ist nicht mehr bezifferbar. Diese Zahlen verdeutlichen, dass mit den bestehenden 20 Aminosäuren bereits so viele Kombinationen möglich sind, dass sie in Gänze nie ausgenutzt werden können. Und es zeigt, dass der Aufbau eines Informationssystems nur starten konnte, indem es mit einer minimalen Anzahl beteiligter Moleküle begann und durch einen effektiven Auswahlprozess begleitet wurde.

Die Sequenz der Aminosäuren, ihre Reihenfolge in den Ketten, bestimmt heute der Code der DNA. Zu Beginn

war es vermutlich derjenige der RNA. Er war von Anfang an Veränderungen unterworfen, die überwiegend durch Mutationen hervorgerufen wurden.

Es bleibt an dieser Stelle die Frage, wie die sehr exakte Beladung der tRNA erfolgt, damit genau diejenige Aminosäure in die Kette eingebaut wird, die der Code der mRNA vorgibt. Entsteht hier ein Fehler, ändert sich sofort die gesamte Konfiguration der Kette. Es ist bei der Komplexität der gefalteten Peptide leicht verständlich, dass sich hierdurch andere Strukturen ausbilden können, die zum Beispiel die Katalysatoreigenschaften eines Enzyms verschlechtern. Sind hiervon Enzyme betroffen, die wichtige Stoffwechselprozesse steuern, kann es zu Zellschäden oder im Extremfall zum Absterben der Zelle kommen.

Die fehlende Ausnutzung der 40 noch zur Verfügung stehenden Code-Wörter durch weitere Aminosäuren hat dazu geführt, dass manche der kanonischen, heute verwendeten Aminosäuren mehrere Transporter für ihren Transport nutzen können. So gibt es neben der Einfachbelegung Aminosäuren, die zwei, vier oder sogar sechs verschiedene tRNAs spezifisch besetzen können. Erstaunlicherweise hat sich aber bei heutigen Arten eine Bevorzugung des Einsatzes einer ganz bestimmten tRNA herausgebildet, obwohl, wie in manchen Fällen möglich, noch fünf weitere zur Verfügung stehen. Die Frage ist, wie diese Zuordnung mit einer hohen Anforderung an Zuverlässigkeit organisiert ist. Hierfür haben sich im Zuge der Evolution große Enzyme entwickelt, die tRNA-Synthetasen, die diese Aufgabe übernehmen. Es sind spezielle molekulare Werkzeuge, die die Verknüpfung jeweils nur einer Aminosäure mit der dazu passenden tRNA gewährleisten. Jede Aminosäurespezies hat ihre eigene Synthetase, die nur sie und eine der passenden tRNAs zusammenführt.

Und somit schließt sich der Kreis. Die Synthetasen beladen die tRNAs sehr genau abgestimmt mit jeweils einer speziellen Aminosäure. Die Transporter bringen die Aminosäuren zu einer Art Reißverschlussystem, wo sie passgenau auf Grundlage der Information aus der DNA zu Ketten verknüpft werden. Diese Peptide bzw. Proteine falten sich, je nachdem, welche Funktion sich bei ihnen entwickelt hat, und bilden einen Großteil der erforderlichen molekularen Werkzeuge, die zum Funktionieren einer Zelle erforderlich sind. Hierzu gehören auch Enzyme, die die Bildung der DNA, RNA, Ribosomen etc. katalysieren.

### Aminosäureketten

Aminosäuren können untereinander zu Ketten verknüpft werden. Sie sind alle aus dem gleichen Grundmolekül aufgebaut, das je nach Aminosäure durch zugehörige Anhänge, sogenannte Seitenketten, erweitert ist. Durch die gleiche Grundstruktur lassen sich die Moleküle jeweils immer an den gleichen Stellen unter Abspaltung eines Wassermoleküls verbinden. Hierzu wird von der einen Seite der ersten Aminosäure eine  $\text{OH}^-$ -Gruppe und von der zweiten Aminosäure ein  $\text{H}^+$ -Ion beigesteuert. Die frei werdenden Anknüpfungspunkte verbinden sich und aus zwei Molekülen entsteht ein Dipeptid. Bei weiterem Zuwachs ergibt sich ein Tripeptid, Tetrapeptid usw. oder allgemein ein Oligopeptid bei bis zu zehn Einheiten. Polypeptide schließen sich mit höheren Stückzahlen in einer Kette an. Eine weitere Grenze ist in etwa bei der Zahl 100 erreicht. Die nachfolgend längeren Ketten werden als Proteine bezeichnet. Die Ketten können sich verdrillen und eine Alpha-Helix bilden. Es ist eine häufige Sekundärstruktur, die dem Protein die größte Stabilität verleiht. Daneben treten als weitere Sekundärstruktur Beta-Faltblätter auf oder es bilden sich komplexere Strukturen aus den Sekundären aus, die zu Tertiärstrukturen werden. Die gefalteten Proteine wiederum können sich zusammenlagern und Riesenmoleküle bilden (Quartärstrukturen mit bis zu 30.000 Einheiten in den größten Proteinen). So entstehen die meisten Enzyme, die wichtige Funktionen in den

Zellabläufen besitzen. Es gibt aber auch einige Enzyme, die nicht aus Proteinen aufgebaut sind. Hierzu gehört die katalytisch aktive RNA (Ribozym), die im Ribosom die Verknüpfung der Aminosäuren unterstützt.

Von Bedeutung ist die exponentiell ansteigende Anzahl der Kombinationen bei 20 beteiligten Aminosäuren. Die Kombinationen berechnen sich nach der Potenz  $20^n$ . Das bedeutet, dass bei der möglichen Nutzung von 20 Aminosäuren eine Viererkette bereits 160.000 verschiedene Kombinationen einnehmen kann ( $20^4$ ). Wenn wir in die Proteinwelt eintauchen, fangen wir bei  $20^{100}$  Variationen an. Eine Anzahl an Möglichkeiten, die auch von der Natur nicht mehr in Milliarden Jahren ausprobiert werden kann. Trotzdem haben sich einige Kombinationen durchsetzen können und sind in der DNA gespeichert. Es macht deutlich, dass sehr leicht ab einer bestimmten Länge der Kette katalytische Eigenschaften entwickelt werden können. Träten diese Eigenschaften nur selten auf, würden bei der großen Anzahl an Kombinationen auch in den langen Zeiträumen kaum passende Funktionsmoleküle gefunden. Gleichzeitig wird sichtbar, dass zu Beginn an der Wechselwirkung zwischen Peptiden und RNA-Speicher nur sehr wenige Aminosäuren beteiligt gewesen sein konnten, sodass die Kombinationsmöglichkeiten nicht zu astronomischen Verhältnissen ausufernten. Werden z. B. nur zwei Aminosäuren miteinander kombiniert, ergeben sich für ein Peptid mit 30 Einheiten bereits eine Milliarde verschiedene Möglichkeiten ( $2^{30}$ ). Es ist nicht abwegig anzunehmen, dass bereits hierbei funktionale Moleküle gebildet werden können.

Und genau an dieser Stelle entsteht das eigentliche Problem bei der Diskussion um die Entstehung des Lebens. Es wird im übertragenen Sinn als das Henne-Ei-Problem bezeichnet. Es beinhaltet die Frage, was zuerst da war, die Henne oder das Ei. Das Problem besteht darin, wie die Information über den Aufbau der Enzyme und hier besonders der Synthetasen in die DNA oder zumindest in den Vorläufer, die RNA, gekommen ist. Die Synthetasen sind Moleküle, die erst ab einer bestimmten Größe die Funktion eines Katalysators einnehmen können.

Die exakt hierfür notwendige Reihenfolge der Aminosäuren kann nicht durch Zufall entstanden sein, wie das Rechenbeispiel mit den großen Zahlen zeigt. Schon gar nicht bei zwanzig verschiedenen Spezies. Die Synthesetasen sind aber unbedingt notwendig, um eine genaue Zuordnung der jeweiligen Aminosäuren zu dem Code aus dem Informationsspeicher zu gewährleisten. Das heißt, sie müssten eigentlich schon vorhanden sein, um das erste Mal selbst gebildet zu werden. Auf diese wichtigste aller Fragen werde ich versuchen, in Abschn. 8 eine Antwort zu geben.

## Literatur

1. Weiss MC, Sousa FL et al (2016) The physiology and habitat of the last universal common ancestor. *Nat. Microbiol.* 1:16116. <https://doi.org/10.1038/NMICROBIOL.2016.116>
2. Hug LA, Baker BJ, Anantharaman K et al (2016) A new view of the tree of life. *Nat. Microbiol.* 1:16048. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.48>
3. Fritsche O (2015) *Biologie für Einsteiger*. Springer, Berlin
4. Watson JD (1968) *Double helix. A personal account of the discovery of the structure of DNA*. Athenaeum, New York



# 5

## Die bisherigen Modelle: Das Sichten des großen Nebels

### Inhaltsverzeichnis

5.1	Von der Antike bis zur modernen Wissenschaft . . . .	96
5.2	Die modernen Anfänge . . . . .	97
5.3	Der Versuch von Harold C. Urey und Stanley L. Miller. . . . .	98
5.4	Der Damm war gebrochen. . . . .	101
5.5	„Black Smoker“ – eine Parallelwelt . . . . .	102
5.6	Eine neue Entdeckung – die „White Smoker“ . . . .	105
5.7	Die Suche ging weiter – warme Tümpel . . . . .	109
5.8	Panspermie – Weltraumsamen . . . . .	114
5.9	Weitere Überlegungen . . . . .	119
	Literatur . . . . .	120

## 5.1 Von der Antike bis zur modernen Wissenschaft

Die Informationen der vorangegangenen Kapitel sind das Minimum, das für die weiterführende Diskussion um die Entstehung des Lebens benötigt wird. Dabei wird deutlich, dass nur eine Gruppe von Wissenschaftlern in der Lage ist, alle Bereiche der einbezogenen Wissenschaftsdisziplinen nach neuesten Erkenntnissen einigermaßen tiefgehend abzudecken. Das Wichtigste hierbei ist, dass die Mitglieder der Gruppe so weit die Grundlagen der Nachbardisziplinen beurteilen können, dass sie Impulse und verknüpfende Überlegungen für die Gesamtfragestellung mit einbringen können. Die günstigen Voraussetzungen, wie ich sie für die Essener Gruppe beschrieben habe, konnte es verständlicherweise in früheren Zeiten nicht geben. Allein die naturwissenschaftlichen Grundlagen fehlten. Wie in der Wissenschaft insgesamt gab es auch für die Frage nach der Entstehung des Lebens eine Entwicklung, die von nichtwissenschaftlichen Vorstellungen über vorsichtige Erklärungsversuche Einzelner bis hin zu Laborversuchen kleinerer Arbeitsgruppen führte.

In der Antike und im Mittelalter galt unter den Gelehrten dieser Zeit die Vorstellung, dass Leben spontan aus Erde oder Schlamm hervorgehen konnte. Der Begründer dieser Idee war der griechische Philosoph und Naturforscher Aristoteles, der die spontane Erzeugung aus unbelebter Materie propagierte. Es war ein Trugschluss aus Beobachtungen, die mangels technischer Hilfsmittel nicht tief genug in die Materie schauen konnten. Die Entwicklung von Würmern und Larven im schlammigen Umfeld oder Schimmel auf den Lebensmitteln war seinerzeit allen bekannt. Ein Nachweis über die Vermehrungswege konnte mit dem damaligen Kenntnisstand noch nicht geführt werden, Bakterien oder Sporen

entzogen sich der Wahrnehmung durch ihre geringe Größe. Die Verhältnisse änderten sich in dieser Beziehung nicht bis in die Neuzeit. Es gab somit über Jahrhunderte keinen Grund, die Interpretation eines der bekanntesten Gelehrten der Antike anzuzweifeln. Noch im 19. Jahrhundert bestand die Vorstellung, dass Leben neben den bekannten Wegen der Vermehrung (Biogenese) auch jederzeit durch eine als Uerzeugung bezeichnete Variante (Abiogenese) möglich sein sollte. In dieser Zeit ging es in der Diskussion um die Uerzeugung allerdings nicht mehr so sehr um die grundsätzliche Frage der Lebensentstehung, sondern um die zusätzliche Möglichkeit, parallel zum bereits bestehenden Leben neues spontan zu erhalten. Der Diskussion setzten die Forschungen des französischen Chemikers Luis Pasteur in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ein Ende. Er konnte durch Versuche zu Gärprozessen und Sterilisationsverfahren den Einfluss von Mikroorganismen auf die Gärung und Schimmelbildung nachweisen. Auf sie hatte sich in der Spätphase der Auseinandersetzung um die Spontanerzeugung inzwischen das Hauptaugenmerk gerichtet.

## 5.2 Die modernen Anfänge

Die naturwissenschaftliche Betrachtung der Frage nach dem Ursprung des Lebens begann nur zögerlich im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts, einer Zeit, in der der britische Naturforscher Charles Darwin seine Überlegungen hierzu formulierte. Er vermutete als Ursprungsort des Lebens einen warmen Tümpel, in dem bei Vorhandensein ausreichender anorganischer Verbindungen und Energie die Entwicklung komplexerer Moleküle begann. Aus ihnen sollte sich schließlich das Leben entwickelt haben. Dieser Prozess sei heute allerdings nicht mehr möglich, da die biologische Aktivität sämtliche Versuche eines Neuanfangs

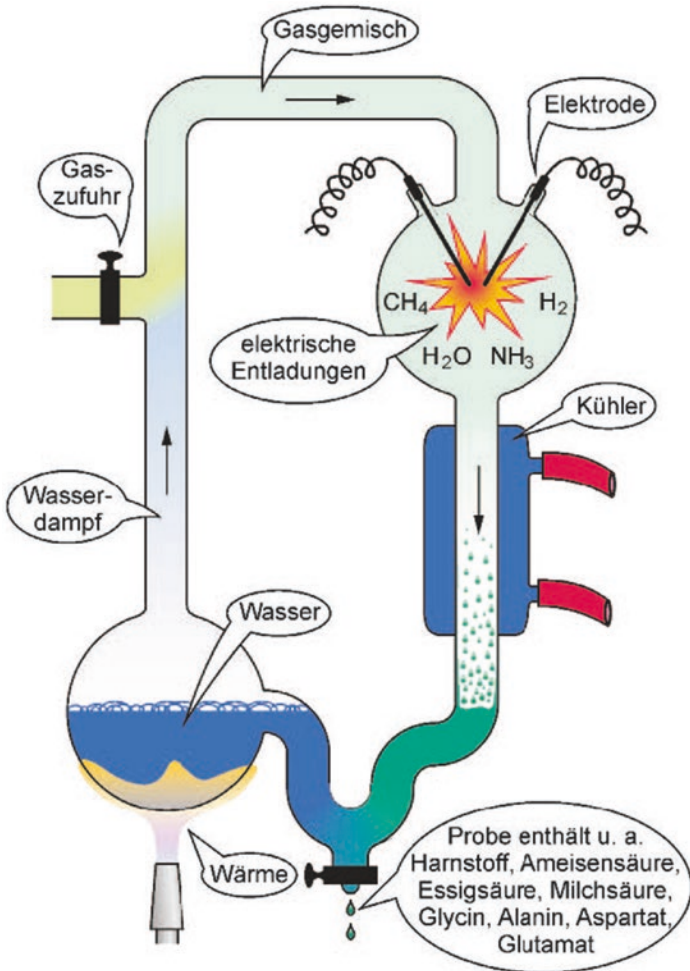


sofort zunichtemachen würde. Die eigentlichen Grundlagen zur Erforschung der präbiotischen Evolution legte aber erst im 20. Jahrhundert der 1894 geborene sowjetische Biochemiker Alexander Iwanowitsch Oparin. Er formulierte eine Hypothese, in der er deutlich machte, dass die Anfangsbedingungen der jungen Erde sich erheblich von denen der heutigen Zeit unterschieden. So machte er Angaben über die Zusammensetzung einer Uratmosphäre, forderte Blitzentladungen, Sonnenlicht und Vulkanismus als Energiequelle und prägte die Sammlung aller entstandenen Moleküle in einem Urozean mit dem Begriff der Ursuppe [1]. Seine Überlegungen gelten heute als überholt, da für die Uratmosphäre eine andere Zusammensetzung angenommen wird, die planetaren Voraussetzungen wegen fehlendem Kenntnisstand nicht berücksichtigt werden konnten und die möglichen Konzentrationen für eine reaktive Ursuppe viel zu gering waren. Aber er hatte die theoretischen Grundlagen für einen der bekanntesten Versuche der Wissenschaften gelegt, das als Ursuppenexperiment in die Wissenschaftsgeschichte eingegangen ist. Es war der Versuch von dem US-amerikanischen Chemiker Harold Clayton Urey und seinem Doktoranden Stanley L. Miller in den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Er baute auf der Hypothese von Oparin auf und führte im Labor zur Bildung von Aminosäuren direkt aus einfachen anorganischen Komponenten.

### **5.3 Der Versuch von Harold C. Urey und Stanley L. Miller**

Warum führen wir nicht einfach einen Versuch durch, der die Überlegungen von Oparin möglicherweise unterstützt? So oder ähnlich müssen sich Urey und Miller es irgendwann in den frühen Fünfzigern des letzten Jahrhunderts

gefragt haben, bevor sie begannen, eine Apparatur zu ersinnen, in der in einfachster Weise einige vermutete Bedingungen der jungen Erde nachgestellt werden konnten (Abb. 5.1) [2]. Sie überführten verschiedene Gase, die sie



**Abb. 5.1** Versuchsaufbau von Urey und Miller zur abiotischen Synthese von organischen Molekülen. (© Springer-Verlag GmbH [3])

als charakteristisch für die Uratmosphäre annahmen, in ein Kolbensystem, das zum Teil mit Wasser gefüllt war. Es waren Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ), Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ). Das Wasser wurde im Kolben erhitzt, sodass Wasserdampf aufstieg und eine Zirkulation in Gang setzte. Diesem Gemisch wurde durch elektrische Entladung Energie zugeführt, ein Vorgang, der dem Einschlag von Blitzen entsprechen sollte. Es gab eine große Überraschung. Aus den anorganischen Stoffen und Methan bildeten sich relativ schnell Aminosäuren, Carbon- und Fettsäuren, die eine wichtige Größe in der organischen Chemie und der Biologie darstellen. Die Sensation war perfekt. Fortan glaubte man, die gebildeten Moleküle seien aus der Atmosphäre in die Ozeane ausgewaschen worden, wo sich eine „Ursuppe“ entwickelt hatte, in der sich alles Weitere auf dem Weg zum Leben abspielte. Es schien nur noch eine Frage der Zeit, bis die Erkenntnisse zur Entwicklung der ersten Zelle vorlagen.

Aber schnell regte sich Kritik. Als Erstes war klar, dass die Konzentrationen der Moleküle bei dieser Art der Bildung so gering waren, dass sie, bevor sie überhaupt ein weiteres Molekül im Ozean hätten treffen können, wieder zerfallen wären. Außerdem änderte sich die Vorstellung von der Zusammensetzung der Atmosphäre. Miller und Urey nahmen eine reduzierte Atmosphäre an, sichtbar an dem  $\text{CO}$  und  $\text{NH}_3$  im Versuch. Die Ausgasung der Erde brachte aber vermutlich überwiegend  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  hervor. Darüber hinaus gab es das Problem der Chiralität. Im Versuch entstanden zu gleichen Anteilen die linkshändigen und rechtshändigen Aminosäuren. In der Natur treten aber bis auf wenige Ausnahmen nur die linkshändigen Aminosäuren auf. Eine Anbindung der Versuchsergebnisse an eine Zellbildung oder gar an eine RNA war durch dieses Experiment nicht möglich. Aber so sehr die Kritik berechtigt war – es war letztendlich der Durchbruch in der

Forschung über die Entstehung des Lebens. Der Versuch zeigte zum ersten Mal eine Möglichkeit auf, sich mit experimentellen Schritten dieser unlösbar scheinenden Frage zu stellen.

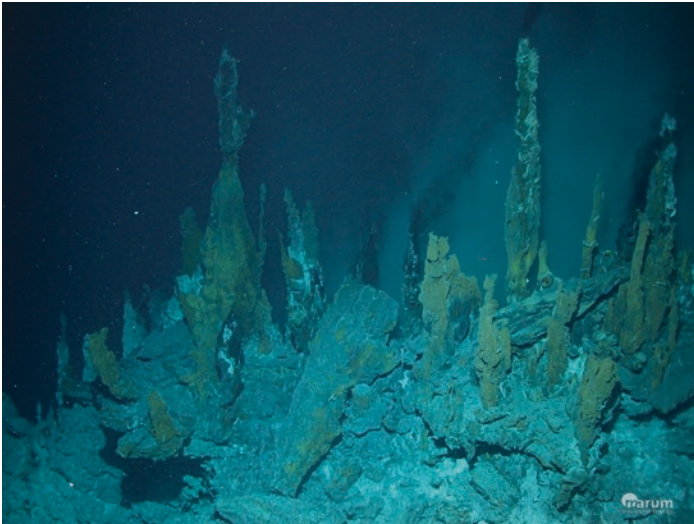
## 5.4 Der Damm war gebrochen

In der Folgezeit wurde eine Vielzahl von Experimenten durchgeführt, um die Probleme der Verknüpfung von Aminosäuren zu Peptiden oder die Verbindung von Nukleotiden zu RNA-Strängen in den Griff zu bekommen. Untersuchungen von Tonmineralen ergaben, dass deren meist negativ geladenen Oberflächen einen wirkungsvollen Kontakt zu positiv geladenen organischen Molekülen bieten und als Katalysatoren bei der Verknüpfung dienen können [4]. Dies geschieht ebenso am Eisendisulfid Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ), das im Kontakt mit Wasserstoff reduziert wird. Das bedeutet, dass ein Schwefelatom aus der Verbindung mit dem Eisen herausgenommen wird und sich mit dem Wasserstoff einlässt. Dieser Vorgang liefert gleichzeitig Energie, die zum Beispiel für die Verknüpfung der Aminosäuren verwendet werden kann. Pyrit ist ein Mineral, das gerade auf der jungen Erde häufig vertreten war. Die Forschung hierzu ist mit dem Namen Günter Wächtershäuser verknüpft, einem Münchner Patentanwalt, der in den achtziger Jahren ein alternatives Szenario für die frühe Evolution des Lebens entwickelt hat, nicht ohne weitreichende Kritik zu erfahren [5, 6]. Seine Hypothese zur Biogenese unterscheidet sich deutlich von allen bis dahin diskutierten Modellen. Während die RNA-Welt-Hypothese (s. Abschn. 6) zum Beispiel für die Startphase des Lebens ein System fordert, das sich durch fortlaufendes Kopieren einer chemisch gespeicherten Information selbst erhält, steht für Wächtershäuser der Stoffwechsel

(Metabolismus) an erster Stelle. Er geht davon aus, dass die Bildung organischer Moleküle mit Kohlenstoff des  $\text{CO}_2$  oder  $\text{CO}$  eine mineralische Oberfläche benötigte, die als Elektronenlieferant zur Verfügung stand. Der Schwerpunkt seiner Diskussion dreht sich um die Bildung von Eisen-Schwefel-Mineralen, bei der am Ende das Mineral Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) entsteht. So kann aus einer Eisen-Schwefel-Verbindung ( $\text{FeS}$ ) im Kontakt mit Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ )  $\text{FeS}_2$  oxidiert werden. Hierbei werden ausreichend Elektronen und  $\text{H}^+$ -Ionen frei gesetzt, die anhaftenden  $\text{CO}_2$ - bzw.  $\text{CO}$ -Molekülen direkt für den Aufbau komplexerer Moleküle zur Verfügung gestanden haben sollen. Ganz von der Hand zu weisen sind seine Überlegungen nicht. Einige der heutigen Enzyme besitzen sogenannte Eisen-Schwefel-Cluster. Sie übernehmen dort wichtige katalytische Funktionen, wobei sie gerade die Stoffe umsetzen, die ganz am Anfang der Entwicklung als Ausgangsprodukte zur Verfügung standen, wie  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  oder  $\text{CO}$ . Aber Wächtershäuser kam mit seinen Überlegungen nicht sehr viel weiter. Es fehlten die Anbindung der Enzymentwicklung und die Bildung der RNA.

## 5.5 „Black Smoker“ – eine Parallelwelt

Interessant war Wächtershäusers Hypothese in Verbindung mit der Entdeckung der „Black Smoker“ 1979 vor den Galapagos-Inseln, die quasi eine Eisen-Schwefel-Welt darstellen (Abb. 5.2). Es handelt sich hierbei um Austrittsstellen bis über  $400^\circ\text{C}$  heißer Tiefseequellen, an denen eine Fülle gelöster metallischer Verbindungen aus den Spalten der Kruste aufsteigen, mit dem Meerwasser reagieren und Ablagerungen aus Metallsulfiden, -oxiden und -sulfaten bilden. Es entstehen hierdurch regelrechte Wolken schwarzer feinverteilter Massen, die nach dem Absinken



**Abb. 5.2** „Black Smoker“ – Gipfelregion des aktiven Vulkans North Su im östlichen Manusbecken in ca. 1200 m Wassertiefe. (© MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, mit freundlicher Genehmigung)

zum Teil schlotartige Strukturen aufbauen. Die hydrothermalen Quellen sind Teil aktiver Ozeanrücken, an denen zwei gegenüber liegende Platten auseinanderdriften. Magma aus dem unterlagernden Erdmantel steigt entlang der Naht zwischen den Plattengrenzen auf und liefert die Energie, die ein gewaltiges Zirkulationssystem am Leben erhält. An den Seiten der aktiven Ozeanrücken sickert Meerwasser durch die Spalten der geklüfteten dünnen Kruste in die Tiefe. Hier wird es aufgeheizt und reagiert mit den Mineralen des Basalts, des Gesteins, das die ozeanische Kruste ausschließlich aufbaut. Vor allem Metalle, die mit Schwefel reagieren, werden aus den Mineralen herausgelöst und abtransportiert. Die Zirkulation schließt sich mit dem Aufstieg dieser heißen, mineralbeladenen Wässer zu den Austrittsstellen der „Black Smoker“.

Direkt in Verbindung mit den „Black Smokers“ stehend, hat sich ein hochspezialisiertes Ökosystem entwickelt, dessen Nahrungsgrundlage als eine der ganz seltenen Ausnahmen nicht das Sonnenlicht ist. Das gesamte System ist auf der chemischen Energie aufgebaut, die durch die austretenden Metallsulfide für chemolithotrophe Bakterien und Archaeen zur Verfügung gestellt wird. Die Mikroorganismen nutzen Elektronen aus Redoxvorgängen, um chemische Reaktionen für ihren Stoffwechsel zu steuern. Aus dem anorganischen Kohlenstoff des  $\text{CO}_2$  und CO gewinnen sie den für ihre eigenen Zellbestandteile notwendigen Kohlenstoff. Darauf aufbauend hat sich eine Nahrungskette entwickelt, die Würmer, Krebse und andere höhere Tiere miteinschließt. Die Entdeckung der hochspezialisierten Einzeller führte schnell zur Überlegung, dass die „Black Smoker“ ein Modell für die Entstehung des Lebens sein könnten [7]. Die thermophilen Mikroorganismen schienen ein ideales Bindeglied zu denen zu sein, die sich vermutlich später im Lauf der Evolution auf kühlere Umgebungen spezialisiert hatten. Sie sind die einfachsten Organismen, die wir kennen. Darüber hinaus war deutlich, dass die Tiefe der Ozeane Schutz vor Sonnenwind und UV-Strahlung bot. Auch einschlagende große Meteorite hätten nur eine Teilverdampfung des Wassers vollzogen, sodass ein Fortbestehen der sich entwickelnden Lebenswelt nicht gefährdet worden wäre. Allerdings gab es Einwände, weil die Schlote nur eine kurze Lebensdauer von wenigen Jahren besitzen und somit keinen langlebigen Bedingungen über die notwendigen Zeiträume bereitstellen. Weiterhin wurde deutlich, dass die Lösungsfracht mit Metallen und die Temperaturen innerhalb der Aufstiegswege zu hoch sind, sodass sich kaum organische Moleküle wie Nukleotide bilden können. Der Zerfall solcher Moleküle geschieht bei den hohen Temperaturen schneller als

ihre Bildung. Bilden sie sich unter bestimmten Randbedingungen mit Hilfe von Mineraloberflächen dennoch, ist die weitere Anbindung an eine Entwicklung zur ersten biologischen Zelle nicht erkennbar. Weiterhin ist die Verknüpfung von Aminosäuren zu Peptiden im Wasser sehr problematisch. Die Verbindung zweier Aminosäuren erfolgt durch Abspaltung eines Wassermoleküls, das sich aus einem OH-Molekül der einen Aminosäure und aus einem Wasserstoffatom der anderen bildet. Befinden sich die Aminosäuren im Wasser, werden sie von Wassermolekülen so voneinander abgeschirmt, dass die Reaktion nicht erfolgen kann. In der wässrigen Umgebung der Zellen funktioniert die Verknüpfung nur, weil durch Enzyme entsprechende Hilfestellungen gegeben werden. Im Endeffekt verlor das „Black Smoker“-Modell mehr und mehr an Zustimmung und wurde nicht weiter verfolgt.

## 5.6 Eine neue Entdeckung – die „White Smoker“

Die Aufgabe der „Black Smoker“ als Modellfall für ein Ursprungsgebiet der Lebensentstehung lief fast parallel mit einer Entdeckung, die auf einer Forschungsfahrt im mittleren Atlantik zur Jahrtausendwende stattfand. Im Jahr 2000 wurde ein neues hydrothermales Gebiet angetroffen, das deutlich andere Eigenschaften aufweist als alle bisher bekannten heißen Quellen auf dem Meeresgrund. Es liegt in einer tektonisch aktiven Zone am mittelozeanischen Rücken, am Rand eines submarinen Massivs aus Mantelgestein (Lost City im Atlantis-Massiv). Das ist das Besondere an dieser Position: Es handelt sich nicht, wie in den meisten anderen Fällen, um einen großen Vulkankomplex, sondern um ein durch Einengung



emporgehobenes Teilstück des oberen Erdmantels [8]. Die Zusammensetzung des Gesteins besteht aus Mineralen, die typisch für Mantelgestein sind. Sie sind sehr reich an Magnesium und Eisen, aber arm an Silizium. Durch zirkulierende, aufgeheizte Wässer werden die vorherrschenden Minerale Olivin und Pyroxen in neue, wasserreiche Serpentinminerale umgewandelt (Serpentinisierung). Hierbei werden Wasserstoff und Methan freigesetzt. Bis zu 60 m hohe Türme aus Kalk haben sich auf dem Meeresgrund gebildet, aus denen niedrig temperierte Wasser mit bis zu 90 °C austreten – ein deutlicher Unterschied zu den Temperaturen der „Black Smoker“ mit mehr als 400 °C (Abb. 5.3). Die „White Smoker“ sind im Gegensatz zu den

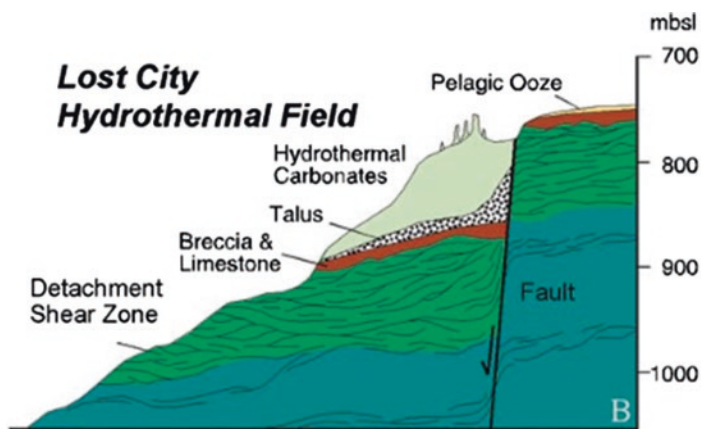


**Abb. 5.3** Spezielle „Smoker“ in der Gipfelregion des aktiven Vulkans North Su im östlichen Manusbecken vor Papua-Neuguinea in ca. 1200 m Wassertiefe. Es sind „Smoker“, aus denen flüssiger Schwefel und Blasen aus  $\text{CO}_2$  austreten. Die Wässer sind mit einem pH-Wert von 1,4 sehr sauer. (© MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, mit freundlicher Genehmigung)

„Black Smokers“ nicht mit hoher Metallfracht beladen. Mit den Wässern treten gelöste Kalziumverbindungen aus den Spalten und Kanälen der Kalktürme aus und lassen diese in Kontakt mit dem  $\text{CO}_2$ -reichen Meerwasser weiter wachsen. Die „White Smoker“ existieren seit mindestens 300.000 Jahren und sind somit wesentlich langlebiger als die Quellen der „Black Smokers“. Methan, Schwefelwasserstoff und Wasserstoff sind Begleiter der karbonatreichen Lösungen und bieten eine Lebensgrundlage für Bakterien und Archaeen, die wiederum Grundlage einer komplexen Nahrungskette sind. Allerdings ist der Reichtum an Lebensformen an den „White Smokers“ wesentlich geringer als bei den „Black Smokers“. Die niedrigeren Temperaturen dieser Quellen sowie die löchrig strukturierten Kalktürme gaben Anlass dazu, dieses Milieu als ideales Umfeld für die Entstehung des Lebens zu definieren. In den folgenden Jahren, zum Teil bis heute, fokussierte sich daher ein Teil der Forscher auf das „White Smoker“-Modell, das sie an vergleichbaren Positionen in den Ozeanen der frühen Erde annahmen [9]. Es verbleiben aber auch hier elementare Probleme. Neben der ebenfalls problematischen Umgebung des Wassers sind noch stärker ausschlaggebend die hohen pH-Werte der alkalischen Fluide, die zwischen pH 9 und pH 11 liegen. Sie sind das Totschlagargument für die Entwicklung einer RNA. Sie wird bei hohen pH-Werten schnell hydrolytisch zersetzt.

Es gibt aber noch weitere Argumente, die „White Smoker“-Theorie als Bestimmung der Ursprungsorte des Lebens in Frage zu stellen. Sie sind ein rezentos Produkt, gebildet unter den heutigen Bedingungen des Ozeans, mit der heutigen Zusammensetzung des Ozeanwassers. Es muss vorausgesetzt werden, dass das Ozeanwasser in der Frühzeit der Erde einen deutlich geringeren pH-Wert besaß, bedingt durch hohe Anteile gelöster Kohlensäure

und Schwefelverbindungen. Die Löslichkeit von Kalk nimmt in einem solchen Milieu deutlich zu, sodass die Bildung von langlebigen Kalktürmen an den hydrothermalen Austrittsstellen äußerst fraglich ist. Das versunkene Plateau in der Nachbarschaft der „White Smoker“ besaß sehr wahrscheinlich ein Korallenriff. Die Lage innerhalb der 30-Grad-Zone nördlich des Äquators ließ eine Riffbildung seitens der Wassertemperaturen durchaus zu. Die Nähe zur Wasseroberfläche des wahrscheinlich in früheren Zeiten höher gelegenen Komplexes muss gegeben gewesen sein, wie ein Profil des Standorts der „White Smoker“ von Kelly et al. (2007) [10] zeigt (Abb. 5.4). Hierin wird deutlich, dass die Kalkschlote von einem Talus (Kalkschutt eines Korallenriffes) und einer sedimentären Kalksteinfolge unterlagert werden. Diese Situation mag die Bildung



**Abb. 5.4** Geologisches Profil des hydrothermalen Felds Lost City mit „White Smoker“. Deutlich wird die unterlagernde Schichtenfolge aus Kalkstein (Breccia und Limestone) und Schutt eines Korallenriffes (Talus). Sie überlagert eine tektonische Scherzone (Detachment Shear Zone) im oberen Bereich des Mantelgesteins. mbsl = Meter unterhalb des Meeresspiegels. (Kelley et al. [10], Fig. 4 B)

der Schlote begünstigt haben und ist für die Frühphase der Erde nicht denkbar. Auch neueste Funde von Austrittstellen im östlichen Manusbecken, die „White Smokers“ ähneln, (Forschungsfahrt FS Sonne SO216, 2011 [11, 12]) zeigen extreme Verhältnisse mit austretendem flüssigen Schwefel, die für eine Entwicklung des Lebens ungeeignet sind.

## 5.7 Die Suche ging weiter – warme Tümpel

Charles Darwin hatte als Erster die Überlegung ins Spiel gebracht, dass das Leben möglicherweise in einem warmen Tümpel begann. In einem Brief an den Botaniker Joseph Hooker spekulierte er im Februar 1871: „But if (and oh what a big if) we could conceive in some warm little pond with all sorts of ammonia and phosphoric salts, light, heat, electricity etcetera present, that a protein compound was chemically formed, ready to undergo still more complex changes“ [13].

Gerade in neuerer Zeit ist diese Idee aufgegriffen worden, da sie augenscheinlich eines der Hauptprobleme lösen hilft. Durch Feucht-trocken-Zyklen an Land ist die Verknüpfung von Aminosäuren zu Peptiden möglich, die im Wasser ohne bereits bestehende Enzyme nicht funktioniert. Unterstützung erhalten die Verfechter dieses Modells durch Funde organischer Moleküle in Meteoritgesteinen, in denen eine Vielfalt unterschiedlicher Aminosäuren gefunden wurde, unter anderem auch solche, die in den biologischen Zellen nicht vorkommen. Dies ist ein wichtiges Indiz dafür, dass es sich bei den Funden nicht um eine Kontamination handelt, die sehr schnell im Kontakt mit der Atmosphäre und dem Boden stattfinden kann.

Das Szenario gestaltet sich wie folgt: Lange nach Bildung einer festen Kruste regneten auf einen über den Meeresspiegel erhobenen Vulkaninselkomplex Meteorite und kosmischer Staub nieder, die im Weltall entstandene organische Moleküle mitbrachten. Ein Teil der Moleküle überstand den Aufprall und gelangte durch Verwitterung der Meteorite in die Regenwasser. Bäche, die vom Vulkangebirge ins Vorland flossen, speisten Seen und Tümpel, von denen ein Teil jahreszeitlich bedingt trockenfiel und anschließend wieder geflutet wurde. Einige von ihnen hatten ihren Ursprung in hydrothermalen Systemen, durch die weitere organische Verbindungen hinzukamen. Als Beispiel können Schlammtümpel und flache Becken im Umfeld vulkanisch aktiver Regionen dienen (Abb. 5.5). Von diesen Tümpeln ausgehend, gab es über Flüsse eine Verbindung zum Meer [14]. Darüber hinaus wird nicht ausgeschlossen, dass zusätzliche Moleküle an Land unter UV-Einfluss gebildet wurden und zur Vielfalt des Angebotes beitrugen.



**Abb. 5.5** Beispiel eines Schlammtümpels mit Anbindung an ein Hydrothermalsystem (Island)

Das Trockenfallen der Tümpel war der Moment, in dem die Aminosäuren zu Peptiden reagieren konnten. Die weiteren Schritte sind komplex und nicht voll formuliert. Es sollen sich innerhalb kürzester Zeit Zellen entwickelt haben, die mit dem weiteren Abfließen ins Meer erste Bakterienkolonien (Stromatolithen) bildeten. Die hierfür angesetzte Zeitspanne erscheint extrem kurz, bedenkt man die Millionen Jahre, die notwendig waren, um entscheidende Veränderungen in der Entwicklung der späteren Zellen zu erhalten. In späterer Zeit lag aber bereits ein funktionierendes System an Abläufen vor, das den Selbsterhalt der Zellen sicherte. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Anfangsphase bis zur ersten Zelle viel Zeit für die unendlich vielen Versuche nach dem „Trial and Error“-Prinzip benötigte. Es besteht keine Einigkeit über den Zeitrahmen, da die Schritte zum Leben noch zu weit im Dunkeln liegen. Es lassen sich lediglich Zeiten für einzelne Reaktionsschritte angeben. Aus den vielen Versuchen, die notwendig waren, um die Bandbreite der Möglichkeiten auszuschöpfen, lässt sich nur eins feststellen: Es war viel Zeit notwendig. Und hierbei kann nicht einmal berücksichtigt werden, dass eine Entwicklung, die kurz vor dem Durchbruch stand, durch ein globales Ereignis ausgelöscht wurde. Danach begann alles wieder von vorn.

Die geologischen Prozesse, die an den ersten Vulkanen oberhalb des Meeresspiegels abliefen, waren dagegen alles andere als langsam. Saure Regenwasser setzten dem ungeschützten Gestein intensiv zu, da weder Boden noch eine Pflanzendecke die Gesteinsoberfläche schützten. Die Folge war eine intensive Verwitterung, die bei kräftigen Niederschlägen zu hohen Erosionsraten führte. Die Folge war eine hohe Sedimentfracht in Bächen und Flüssen, die jedes entstehende Becken oder kleinere Tümpel in kürzester Zeit auffüllten. Gerade die trockenfallenden Tümpel

mit geringer Aufnahmekapazität waren nach wenigen Hundert Jahren geschlossen. Sollten auf ersten Kontinenten aride Zonen wie zum Beispiel in Australien existiert haben, müssen trockenfallende Becken schnell durch aus Lösungen ausgefällte Salze und Karbonate gefüllt worden sein, sofern nicht vulkanische Aschen dies übernahmen. Entsprechende Beispiele sind heute noch in ariden Regionen weit verbreitet. Sollten sich neue Tümpel gebildet haben, waren diese in den meisten Fällen nicht an die Prozesse ihrer Vorgänger angebunden, sodass dies jeweils einem Neustart glich. Der Raum für die Entwicklung des Lebens sollte allerdings über Jahrmillionen zur Verfügung gestanden haben.

Es gibt weitere Argumente gegen das Tümpelmodell. Die Meereszeiten waren durch die große Nähe des Mondes zur Erde kurz nach seiner Entstehung extrem kräftig ausgebildet. Die auf die Inselberge im Ozean treffenden Wassermassen führten zu einer wesentlich schnelleren Erosion, als es heute der Fall ist. Hinzu kamen nicht seltene „Impact“-Ereignisse, die statistisch gesehen überwiegend im Meer stattfanden und vermutlich die Inseln komplett überspülten. Anders sieht es bei größeren Komplexen wie Island oder ersten Kleinkontinenten aus, die von den großen Überflutungen verschont blieben. In diesem Fall müssen für ein Modell, das die ungeschützte Erdoberfläche als Entstehungsort zur Grundlage hat, die eingangs angesprochenen Faktoren diskutiert werden. Die Sonne hatte in der Anfangsphase zwar eine um 30 % verminderte Strahlkraft, die UV-Strahlung war aber um Größenordnungen stärker. Die Ursache hierfür lag in der anfänglich hohen Eigenrotation der Sonne, die einen starken Dynamoeffekt mit verstärkter Aktivität an der Sonnenoberfläche erzeugte [15]. Da der Atmosphäre vor der Entwicklung der Photosynthese betreibenden

Einzeller der Sauerstoff fehlte, gab es keine Ozonschicht, die die UV-Strahlung abhalten konnte. So prallte die wesentlich stärkere Strahlung in dem Zeitraum der ersten Milliarden Jahre ungeschützt auf die Erdoberfläche. Mögliche Bildungen langkettiger Verbindungen waren hierdurch von Beginn an einem extremen Auslesefaktor ausgesetzt. Gleiches galt für den starken Partikelstrom, der als Sonnenwind auch heute noch an manchen Tagen in schwächerer Form Einfluss auf die Erdatmosphäre ausübt. Bei einem fehlenden oder sehr gering ausgebildeten Magnetfeld hatte der Partikelstrom von der Sonne ungehinderten Zugriff auf alles, was sich auf der Erdoberfläche entwickelte. Solange nicht geklärt ist, ab wann ein wirksames Magnetfeld vorlag, muss der mögliche Partikelstrom von der Sonne als wichtige Größe mitdiskutiert werden.

Ein weiteres Problem ist die Konzentration der durch die kosmischen Partikel im Beipack gelieferten Moleküle. Es gibt nur eine kleine Größenfraktion der Meteorite, bei denen ein Überleben der organischen Substanzen auf dem Weg durch den Weltraum und durch die schon damals existierende Atmosphäre bis zur Erdoberfläche möglich war. Kleinere Partikel bieten den Molekülen keinen Schutz vor der alles zerstörenden UV-Strahlung im Weltraum. Die nächstgrößeren Einheiten in Zentimeter- und Dezimetergröße werden beim Queren einer möglichen Atmosphäre so stark aufgeheizt, dass die organischen Moleküle zerstört werden. Nicht anders sieht es bei den richtig großen Körpern aus, die bei der Kollision mit der Erde so viel Bewegungsenergie in Wärme umwandeln, dass alles verdampft. Nur eine kleine Fraktion dazwischen ist groß genug, um den Molekülen im Inneren ausreichend Schutz vor der Strahlung im Weltall zu bieten und beim Kontakt mit der Atmosphäre bzw. der Erdoberfläche nicht zu verglühen.



Die erste Frage, die hieran anschließt, ist die nach der Häufigkeit der Ereignisse in einem Einzugsgebiet für einen angenommenen trockenfallenden Tümpel. Sind die extrem geringen Molekülkonzentrationen (im Bereich von 1 zu  $10^{12}$  pro Meteoritenmaterial) ausreichend, bei einem angenommenen Meteoritenfall von 1 pro Jahr (oder pro 10 Jahren), um eine biochemische Evolution in Gang zu setzen? Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Moleküle für notwendige Reaktionen nicht alle gleichzeitig zur Verfügung standen. Die Freisetzung erfolgte im Zuge der Verwitterung von der Oberfläche her und von kleinsten Rissen ausgehend auch aus tieferen Partien, Mikrometer für Mikrometer über einen Zeitraum von Hunderten von Jahren. Das bedeutet, die ersten freigesetzten organischen Verbindungen wurden lange vorher in die Fließsysteme gespült oder im Sediment eingebettet, bis die letzten Moleküle aus den Meteoriten zur Verfügung standen. Nur viele Milliarden gleichzeitig verwitternder Meteorite mit der passenden Größe wären in der Lage gewesen, eine Ressource für die erforderlichen organisch-chemischen Prozesse bereitzustellen. Dass diese Moleküle bei ihrer Freisetzung und dem nachfolgenden Transport einer Vielzahl von Zerstörungsmechanismen ausgesetzt waren, ist bereits weiter oben beschrieben worden. Die gesamte vorangegangene Argumentation ist hinfällig, wenn die Erdoberfläche vor dem Vorhandensein einer Atmosphäre vollständig vereist war (s. Abschn. 2.4).

## 5.8 Panspermie – Weltraumsamen

„Das Weltall lebt, unvorstellbare Kreaturen kämpfen um die Vormacht in der letzten zu verteidigenden Galaxie, Raumschiffe schießen durch das All ...“ Unsere Köpfe sind voll von Bildern aus Filmen und Romanen

der Science Fiction, die seit vielen Jahrzehnten all die begeistern, denen es gedanklich auf der Erde zu eng geworden ist. Die Erzählungen prägten ganze Generationen in ihren Vorstellungen von intelligentem, außerirdischem Leben, das durch die gleichen Charakterschwächen ausgezeichnet ist wie das des irdischen. Auch Naturwissenschaftler sind nicht frei von diesen Gedanken, obwohl sie die überall geltenden Gesetze der Physik, die in den Science-Fiction-Romanen außer Kraft gesetzt zu sein scheinen, genauer einschätzen können. Allerdings geht es ihnen nicht um Weltraumslachten, die geschlagen werden, sondern um viel grundlegendere Dinge, nämlich das Leben selbst. In den Anfängen der modernen Naturwissenschaften erschien es den Wissenschaftlern sehr fragwürdig, dass das Leben auf der Erde entstanden sein sollte. Der Kosmos bot ihrer Ansicht nach für eine Lebensentwicklung sehr viel mehr Möglichkeiten, sodass die Wahrscheinlichkeit für eine Impfung der Erde von außen durchaus als Alternative angesehen wurde. Es erstaunt, dass diese Überlegungen bereits vor mehr als 100 Jahren diskutiert wurden, in einer Zeit, in der es kaum Kenntnisse von Planeten außerhalb unseres Sonnensystems und den Gesetzmäßigkeiten des Weltalls gab. Die Vorstellungen rankten sich um weit entfernte Planeten, auf denen günstigere Verhältnisse für die Entstehung des Lebens vorhanden waren als auf der Erde. Sie wurde anschließend durch Transfer von Keimen infiziert, eine Vorstellung, die heute als Panspermie bezeichnet wird. Nicht nur der Transportmechanismus war unklar, auch die Überlebenschancen im Weltraum und bei der Landung auf der Erde waren spekulativ.

Dieser frühe Gedanke, der sehr an Science Fiction erinnert, ist selbst von namhaften Wissenschaftlern wie Francis Crick und Leslie Orgel in den siebziger Jahren geäußert worden. Crick erhielt zusammen mit James

Watson und Maurice Wilkins den Medizin-Nobelpreis für die Entdeckung der Molekularstruktur der DNA (vgl. Abschn. 4.2). Der Chemiker Leslie Orgel forschte auf dem Gebiet der chemischen Evolution. Die beiden Wissenschaftler diskutierten sogar die Möglichkeit einer gerichteten Panspermie. Ihrer Vorstellung nach sollten vom Untergang bedrohte Zivilisationen fremder Planeten gezielt Körner mit Bakterien ins Weltall ausgesandt haben, um entfernte Planeten mit Lebenskeimen zu infizieren. Nachfolgend wäre dann eine Kolonisation möglich [16]. Dieser Ansatz lässt sich schnell hinterfragen, da die zeitlichen Größenordnungen zwischen einer Impfung eines Planeten mit Biosporen und einer möglichen Bewohnbarkeit durch nachfolgende intelligente Lebensformen völlig auseinandergehen. Allein die Produktion von Sauerstoff auf der Erde hat über eine Milliarde Jahre gedauert; so lange brauchte es, bis der Verbrauch durch oxidative Reaktionen mit Eisen und Schwefel so weit zurückgegangen war, dass überschüssiger Sauerstoff in der Atmosphäre angereichert werden konnte. Diese Zeit hatten die bedrohten Zivilisationen auf den fremden Planeten sicher nicht.

Lässt man die Begründung von Crick und Orgel außer Acht, wirft der auf den ersten Blick faszinierende Gedanke einer Impfung der Erde von außen bei genauer Betrachtung erheblich mehr Fragen auf, als dass er Antworten gibt. Als Erstes trägt er nicht dazu bei zu klären, wie das Leben entstanden ist. Das Problem wird nach außen verlagert, in eine unbekannte Region, für die die Kenntnis sämtlicher Rahmenbedingungen fehlt. Weiterhin fehlen Informationen über die Verhältnisse der Region, aus der der Start erfolgte, und darüber, wie der Transport über sehr lange Zeiträume bei ständigem Beschuss kosmischer Strahlung überstanden werden kann. Den kleinen Körnern würde letztlich jegliche Schutzhülle fehlen. Das

Hauptproblem wäre aber die Partikeldichte. Von einem angenommenen Ausgangspunkt im Weltall aus müsste eine gewaltige Partikelanzahl in eine Richtung geschossen werden, die nach wenigen Lichtjahren eine derart große Streuung aufweisen würde, dass ein Treffen mit einem Planeten ein enorm großer Zufall wäre. Eine kleine Vorstellung davon bietet das Bild eines Brausekopfes einer Dusche, die auf dem Mond in Richtung Erde sprüht. Lassen wir die Anziehungskräfte des Mondes und die Atmosphäre der Erde außen vor und positionieren wir auf der Erde genau einen Menschen. Wenn ein Strahl überhaupt auf der Erde einträfe, wäre die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Mensch getroffen würde, äußerst gering. Oder nehmen wir eine Supernovaexplosion in einer benachbarten Galaxie, bei der wirklich viel Material ins All geschleudert wird: Wie viele Partikel kommen davon auf der Erde an? Sollte tatsächlich ein mit Bakterien beladenes Partikel auf einen Planeten treffen, der sich in der habitablen Zone befindet, und der Inhalt den Landeanflug überstehen, wären die Mikroben mit ganz profanen Dingen wie der Einbettung im Sediment oder der Auflösung in aggressiven Wässern konfrontiert. Die Chance für ein Aufblühen des Lebens ginge hierbei gegen Null.

Nicht ganz so unrealistisch scheint der Austausch von Materie allerdings zwischen zwei benachbarten Planeten zu sein. So sind Milliarden Tonnen Gesteinsmaterial durch Einschläge großer Meteorite vom Mars zur Erde gelangt. In umgekehrter Richtung war der Anteil wesentlich kleiner. Die Mengen können aber ausgereicht haben, um resistente Einzeller mit den Gesteinen in beide Richtungen zu transportieren [17]. Die Chance ist rein theoretisch gegeben, wenn die Einzeller im porösen Gestein von einer mindestens einen Meter starken Gesteinsschicht ummantelt sind. Hier ist auch nach einer zu erwartenden Flugzeit von mehr als einer Million Jahre (auf Bahnen,

die sich langsam der Erde nähern) keine Auswirkung der UV-Strahlung zu erwarten. Und dass Einzeller einen derart langen Zeitraum überstehen können, ist zumindest für Bakteriensporen nachgewiesen. So konnten mindestens 25 Mio. Jahre alte Exemplare aus Bienen gewonnen werden, die über diese Zeit in Bernstein eingeschlossen waren [18]. Die Frühphase des Mars bot mit ausreichend Wasser zu Beginn durchaus ähnliche Bedingungen für eine Lebensentwicklung wie die Erde. Interessant ist die Überlegung, ob das Leben zweimal entstanden ist, vielleicht auf dem Mars und der Erde parallel. Bei einem Treffen der beiden Formen ist ein Austausch allerdings schwer vorstellbar. Mit jedem genetischen Code, der sich selbstständig entwickelt, entsteht eine Art selbständiger Sprache. Die biologische Kommunikation zwischen den beiden separat entwickelten Linien des Lebens wäre nicht möglich.

Dass im Weltraum und auf anderen Planeten organische Verbindungen gebildet werden, ist inzwischen gut belegt. Analysen des 1969 in Viktorien/Australien eingeschlagenen Murchison-Meteoriten ergaben eine erstaunliche Vielfalt organischer Moleküle, die den Aufprall auf der Erde überlebt haben [19]. Das Auftreten von 70 Aminosäuren, von denen die meisten nicht aus biologischen Prozessen stammen, sowie die hohe Prozentzahl der D-Konfiguration statt der L-Konfiguration machen eine Kontamination unwahrscheinlich. Selbst organische Basen, die Grundbausteine von RNA und DNA, wurden in kohlenstoffhaltigen Meteoriten gefunden. Darunter waren in einigen Fällen Basen, die nicht oder nur sehr selten auf der Erde vorkommen. Dies wird als ein deutlicher Hinweis auf eine extraterrestrische Herkunft gewertet [20].

Insgesamt bestätigt sich, dass die Bildung organisch chemischer Moleküle nicht auf die Erde begrenzt ist, sondern weit verbreitet im Weltall möglich ist. Es scheint

nicht das Problem zu sein, die Entstehung von Aminosäuren, Lipiden und organischen Basen generell zu erklären. Das Problem ist, sie an einem Ort so zusammenzuführen, dass sie über einen sehr langen Zeitraum in hoher Konzentration miteinander wechselwirken können und dass es einen Motor gibt, der diese Wechselwirkungen anschiebt. Erst unter solchen Voraussetzungen besteht die Möglichkeit, eine so komplexe Maschinerie wie die der biologischen Zelle zu entwickeln.

## 5.9 Weitere Überlegungen

Es gibt zahlreiche weitere Ideen und Modelle, die einzelne Aspekte behandeln und Hinweise auf besondere, im Detail mögliche Entwicklungsschritte geben. Eine komplette Darstellung aller Forschungsansätze würde schnell den Rahmen dieses Buches sprengen. Erwähnenswert sind aber zwei weitere Ansätze, die kurz erwähnt werden sollen. Ein auch in mehreren populärwissenschaftlichen Veröffentlichungen vorgestelltes Modell beinhaltet den Gefrierprozess von Meerwasser als Basis für die Lebensentstehung. Kern des Modells ist eine Aufkonzentrierung organischer Moleküle durch das gefrierende Meerwasser. Beim Gefrieren werden zuerst Eiskristalle aus Süßwasser gebildet, wodurch sich Salze und organische Moleküle in verbleibenden Poren anreichern, die wiederum von Eismembranen umgeben sind. Hierdurch sollen Bedingungen entstehen, die für eine Verknüpfung der Moleküle günstig sind. Wie auch für andere Umgebungen beschrieben, ist Wasser für die Verknüpfung von Molekülen zu Peptiden oder RNA-Strängen eine große Hürde. Durch das Gefrieren wird es den Poren aber ausreichend entzogen, wodurch die Reaktionen ablaufen können. Dieses stark umstrittene Modell wurde von dem 2016 verstorbenen

Physiker Hauke Trinks von der Universität Hamburg-Hamburg entwickelt [21]. Er setzte voraus, dass es auf der jungen Erde bereits Phasen der Vereisung gab, was nicht ausgeschlossen werden kann. Sein Modell erklärt nicht die Herkunft der Moleküle und nicht, wie die verschwindend geringen Anteile im Urmeer die notwendig hohen Konzentrationen für Reaktionen in den Eisporen erbringen konnten.

Ein anderes, viel diskutiertes Modell stammt von Manfred Eigen, Chemie-Nobelpreisträger 1967 vom Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen. Er verstarb kurz nach meinem erfolglosen Versuch, mich mit ihm über unsere neuen Erkenntnisse und das vorliegende Buch auszutauschen. Eigen entwickelte auf Grundlage der Darwin'schen Evolution mathematische Modelle, die auf die Selbstorganisation größerer Moleküle zielen. Die Selbstorganisation sollte zur Bildung von sich selbst reproduzierenden Einheiten führen und gleichzeitig funktionsfähige Großmoleküle entwickeln. Von ihm stammen die Begriffe „Quasispezies“ und „Hyperzyklus“ [22].

## Literatur

1. Oparin AI (1938) The origin of life. Academic Press, New York
2. Miller SL (1953) A production of amino acids under possible primitive earth conditions. *Science* 117(3046):528–529
3. Müller-Esterl W (2018) *Biochemie*. Springer, Heidelberg
4. Pedreira-Segade U, Feuillie C, Pelletier M, Michot LJ, Daniel I (2016) Adsorption of nucleotides onto ferromagnesian phyllosilicates: significance for the origin of life. *Geochim Cosmochim Acta* 176:81–95
5. Wächtershäuser G (1990) Evolution of the first metabolic cycles. *Proc Nat Acad Sci* 87:200–204

6. Wächtershäuser G (2000) Origin of life: life as we don't know it. *Science* 289(5483):1307–1308
7. Russell MJ, Hall AJ, Cairns-Smith AG, Braterman PS (1988) Submarine hot springs and the origin of life. *Nature* 336:117
8. Karson JA, Früh-Green GL, Kelley DS, Williams EA, Yoerger DR, Jakuba M (2006) Detachment shear zone of the Atlantis Massif core complex, Mid-Atlantic Ridge, 30 °N. *Geochem Geophys Geosys* 7(6):21. <https://doi.org/10.1029/2005gc001109>
9. Martin W, Russell MJ (2007) On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent. *Philos Trans R Soc B* 362:1887–1925
10. Kelley DS, Früh-Green GL, Karson JA, Ludwig KA (2007) The lost city hydrothermal field revisited. *Oceanography* 20(4):90–99, Special Issue on Ocean Exploration
11. Bach W (2011) Wochenbericht SO-216 (BAMBUS), 15.06.–22.06.2011, Townsville, Australien – östliches Manus-Becken, Papua-Neuguinea. [http://epic.awi.de/37102/20/SO216\\_wr.pdf](http://epic.awi.de/37102/20/SO216_wr.pdf). Zugegriffen: 29. Apr. 2019
12. Reeves EP et al (2011) Geochemistry of hydrothermal fluids from the PACMANUS, Northeast Pual and Vienna Woods hydrothermal fields, Manus Basin, Papua New Guinea. *Geochim Cosmochim Acta* 75:1088–1123
13. Darwin C (1887) The life and letters of charles darwin, including an autobiographical chapter. John Murray, London
14. Van Kranendonk MJ, Deamer DW, Djokic T (2017) Life on earth came from a hot volcanic pool, not the sea, new evidence suggests. *Scientific American* 317:28–35
15. Cnossen I, Sanz-Forcada J, Favata F, Witasse O, Zegers T, Arnold NF (2007) Habitat of early life: solar X-ray and UV radiation at Earth's surface 4–3.5 billion years ago. *J Geophys Res* 112:1–10. <https://doi.org/10.1029/2006je002784>
16. Crick FHC, Orgel LE (1973) Directed Panspermia. *Icarus* 19:341–346



17. Mileikowsky C, Cucinotta FA, Wilson JW, Gladman B, Horneck G, Lindegren L, Melosh J, Rickman H, Valtonen M, Zheng JQ (2000) Natural transfer of viable microbes in space. 1. from mars to Earth and Earth to mars. *Icarus* 145:391–427
18. Cano RJ, Borucki MK (1995) Revival and identification of bacterial spores in 25- to 40-million-year-old Dominican amber. *Science* 268(5213):1060–1064
19. Meierhenrich UJ, Munoz Caro GM, Bredehöft JH, Jessberger EK, Thiemann W (2004) Identification of diamino acids in the Murchison meteorite. *PNAS* 101:9182–9186
20. Callahan MP, Smith KE, Cleaves HJ, Ruzicka J, Stern JC, Glavin DP, House CH, Dworkin JP (2011) Carbonaceous meteorites contain a wide range of extraterrestrial nucleobases. *PNAS* 108(34):13995–13998
21. Trinks H, Schröder W, Biebricher CK (2005) Ice and the origin of life. *Orig Life Evol Biosph* 35:429–445
22. Eigen M, Schuster P (1979) *The hypercycle – a principle of natural self-organization*. Springer, Berlin



# 6

## Die RNA-Welt: Der Start mit einem ganz besonderen Molekül?

### Inhaltsverzeichnis

6.1 Die RNA, ein Molekül mit Fähigkeiten . . . . .	123
6.2 Probleme der RNA-Welt . . . . .	128
Literatur . . . . .	129

### 6.1 Die RNA, ein Molekül mit Fähigkeiten

Die Geschichte der Erde wird von den Geologen gern in Abschnitte eingeteilt, in denen global über lange Zeiträume gleichbleibende Verhältnisse herrschten. Eine etwas unscharfe, mehr ergänzende Einteilung wird mit Hilfe von Lebewesen getroffen, die zu bestimmten Zeiten die vorherrschenden Gruppen stellten. Am bekanntesten ist die Zeit der Dinosaurier, die vor ca. 230 Mio. Jahren begann und bis zur Kreide-Paläogen-Grenze vor 66 Mio. Jahren andauerte. Es folgte die Zeit der Säugetiere. Vor den

Dinosauriern gab es zum Beispiel die Zeiten der Amphibien, Fische oder auch der Trilobiten. Für den Beginn des Lebens wurde relativ früh vermutet, dass der komplexe Informationsspeicher DNA eine evolutiv höhere Entwicklung darstellt als die RNA, die in gewisser Weise auch Information speichern kann. Die Überlegungen hierzu stammten vom US-amerikanischen Mikrobiologen Carl Richard Woese. Darauf aufbauend schlug Walter Gilbert, ein US-amerikanischer Biochemiker, Mitte der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts den Begriff „RNA-Welt“ vor. Das Zeitalter der RNA war geboren, wobei der genaue Anfang und das Ende bis heute unklar sind. Seit dieser Zeit wird jedenfalls von vielen Wissenschaftlern, die den Ursprung des Lebens erforschen, die RNA-Welt-Hypothese befürwortet.

Und was macht die RNA-Welt Hypothese so attraktiv? Es war die Entdeckung einer speziellen RNA, die in der Lage ist, katalytische Eigenschaften zu entwickeln [1]. Sie wurde im Ribosom eines eukaryotischen Einzellers aufgespürt, in dem molekularen Werkzeug, das für den Zusammenbau der Proteine zuständig ist. Mit anderen Worten, diese RNA kann etwas, das normalerweise an anderer Stelle von Enzymen durchgeführt wird. Allerdings ist die Geschwindigkeit der katalytischen Vorgänge wesentlich geringer als bei den heutigen Enzymen. Schnell entwickelte sich die Vorstellung, dass zu Beginn des Lebens primär eine RNA mit katalytischen Eigenschaften vorlag und erst nach und nach ein Übergang der Funktionen auf die effizienteren Enzyme erfolgte. Und das ist noch nicht alles. Die RNA ist gleichzeitig über die Reihung der Basentriplets ein Informationsspeicher, der nur in die richtige Beziehung zu den anderen Molekülen gebracht werden musste. Möglicherweise begann mit der RNA sogar der Start der Aminosäureverketzung zu Peptiden, die sich bis heute in den Ribosomen fortsetzt.

Darüber hinaus kann die RNA sich unter bestimmten Umständen selbst kopieren – die ideale Voraussetzung für eine Verknüpfung der Proteinwelt mit der RNA-Welt.

Laborversuche ergaben, dass die Ribose, der Zucker der RNA, wesentlich leichter aus verfügbaren präbiotischen Ausgangsstoffen zu erhalten ist als die Desoxyribose, der Zucker der DNA. In heutigen Zellen wird die Desoxyribose mit Hilfe eines Enzyms aus Ribose hergestellt. Darüber hinaus wird die DNA aus Bausteinen der RNA erzeugt, die folglich in der Zelle erst einmal vorhanden sein muss. Dies sind Hinweise auf die lebensgeschichtliche Altersstellung der Moleküle, die nahelegen, dass die RNA vor der DNA existierte. Der Übergang von der RNA- in die DNA-Welt hatte anscheinend Vorteile, die durch die deutlich geringere Lebensdauer der RNA aufgrund ihrer chemischen Instabilität bedingt waren. Ursache hierfür ist der etwas anders zusammengesetzte Zucker Ribose in der RNA im Vergleich zur Desoxyribose in der DNA. Während die Ribose ein OH-Molekül an einer Stelle des ringförmig aufgebauten Zuckers besitzt, befindet sich an gleicher Stelle im Zucker der DNA nur ein Wasserstoff, der Sauerstoff fehlt (Desoxy = ohne Sauerstoff). Treten bei höheren pH-Werten durch vorhandene Basen verstärkt OH-Moleküle auf, entreißen diese dem OH-Molekül der Ribose den Wasserstoff (H), um ein Wassermolekül zu bilden. Mit dem einzelnen Wasserstoff der Desoxyribose passiert dies nicht, da das H-Atom zu fest an den Ring des Zuckers gebunden ist. Mit dem Verlust des Wasserstoffatoms bei der Ribose verbindet sich der verbliebene Sauerstoff sofort mit dem Phosphat des Rückgrates der RNA. Dieses gibt gleichzeitig die Bindung zum nächsten Ribosemolekül auf; die RNA zerfällt [2]. Sie wird hydrolysiert. Die Reaktion zeigt gleichzeitig, dass die RNA bei höheren pH-Werten keine Stabilität besitzt. Und genau das war eines der Argumente aus biochemischer Sicht gegen die „White Smoker“. An ihnen treten Wässer mit

hohen pH-Werten auf, die einer RNA keine Überlebenschance geben. In den heutigen Zellen ist die Lebensdauer der verschiedenen RNA-Moleküle auf wenige Minuten begrenzt. Danach haben sie ihre Funktion erfüllt, werden in Einzelbausteine zertrennt und stehen für den Zusammenbau neuer RNA mit neuen Aufgaben zur Verfügung. Die DNA hat dagegen bei gleichem Speicherprinzip eine hohe Stabilität, was allein durch Funde in Knochen von Menschen aus prähistorischer Zeit wie den Neandertalern belegt ist.

Der Vergleich von RNA und DNA macht wahrscheinlich, dass sich zu Beginn des Lebens die RNA gebildet und mit fortschreitender Evolution daraus der stabilere Langzeitspeicher DNA entwickelt hat. Die RNA wurde beibehalten und entwickelte sich zu unterschiedlichsten Funktionsträgern weiter. Jetzt stellt sich aber die Frage, wie der Informationsspeicher aussah bzw. funktionierte, bevor die stabilere DNA die RNA ablöste.

Und damit tangieren wir eine der wesentlichen Schwierigkeiten in der RNA-Welt. Als die DNA im Rahmen der Evolution die Bühne betrat, waren die Abläufe der Speicherung und Informationsinhalte der Basentriplets sehr wahrscheinlich seit langem etabliert. Das bedeutet, die Funktion, die die DNA neu übernommen hatte, muss vorher von der weniger stabilen Form der RNA ausgeführt worden sein. Setzen wir voraus, dass zu Beginn in einem günstigen Umfeld Nukleotide zu einer RNA zusammengebaut worden waren – so ergab sich ohne „Bauanleitung“ eine zufällig zusammengewürfelte Reihenfolge von Basen, mit der keinerlei Informationsinhalt für eine Anordnung von Aminosäuren in einem Protein verbunden war. Es fehlte die Matrize, die der Basenreihung eine Logik verlieh. Die Situation ist vergleichbar mit einer langen Zahlenkolonne der Zahlen 1 bis 4 in beliebiger Reihenfolge ohne

Leerstellen, die ein ganzes Buch füllt. Immer drei der vier Zahlen sollen eine Informationseinheit darstellen. Ohne Kopplung an ein Auslesesystem, das einem Dreierblock einen genau definierten Inhalt zuordnet und zugleich festlegt, ab welcher der drei ersten Zahlen der Leseprozess starten soll, ist hieraus keine Information ablesbar. Allerdings stellt der Strang selbst eine Information dar, die bei jedem Kopiervorgang weitergegeben wird. Bekommt eine zufällig zusammengestellte Abfolge von Basen in einer RNA eine bestimmte dreidimensionale Struktur, die zum Beispiel katalytisch aktiv ist, bleibt diese Eigenschaft durch das Kopieren erhalten.

Hinsichtlich der Zuordnung der Codons aus einer RNA zu einer bestimmten Aminosäurenreihung in einer Kette lässt sich eine interessante Überlegung anstellen. Angenommen, es würden heute RNA-Stränge aus der ganz frühen Anfangsphase der chemischen Evolution gefunden werden, dann ließen sich bei ihnen, wie auch bei den heutigen RNA-Strängen, jeweils drei nebeneinander liegende Basen zu einem Triplet definieren. Hierbei ergibt sich die Schwierigkeit, einen Anfang festzulegen. Die Basen liegen in einer RNA alle direkt nebeneinander, wodurch die Festlegung der ersten Dreiergruppe an drei verschiedenen Punkten beginnen kann. Mit jedem „Weiterrücken“ des Starts um eine Base verschieben sich alle Triplets zu einer neuen Dreiergruppensortierung nach hinten. In der Konsequenz ergäben sich für das Ablesen einer RNA drei völlig verschiedene Zuordnungen in der Triplet-Festlegung. Das stört erst einmal nicht, es erhöht nur die Möglichkeiten für die nachfolgende Überlegung: Für die zufällige Abfolge von Basen innerhalb eines jeden Triplets würden sich mit Sicherheit komplementäre Anticodons der heutigen tRNAs finden, die für jeweils eine Aminosäure spezifisch sind (bis auf die vier Ausnahmen

der Start- und Stopp-Triplets). Vor mehr als 4 Mrd. Jahren gab es die heutigen spezifisch beladbaren tRNAs aber noch nicht. Das heißt, wir könnten die RNA der Anfangszeit mit Hilfe der modernen tRNAs testen und feststellen, welche Aminosäurenkette sich aus ihrem vermeintlichen Speicher ergibt. Das Ergebnis ist vorhersehbar. Es gäbe jedes Mal völlig funktionsfreie Aminosäureketten. Mit anderen Worten: Der Informationsgehalt einer zufälligen Basenfolge in einer RNA ist so lange nicht verwertbar, wie es keine Anbindung an ein Informationssystem gibt. Dieses System erfordert eine exakte Informationszuordnung zwischen RNA, tRNAs und zugehörigen Synthetasen, die die tRNAs spezifisch beladen. An dieser Stelle haben wir ein Ei und wissen nicht, wie es gelegt wurde, weil wir keine Henne haben.

## 6.2 Probleme der RNA-Welt

Bisherige Experimente zur Erzeugung langer RNA-Stränge haben gezeigt, dass der Abbau durch die eigene katalytische Aktivität schneller voranschreitet als der Aufbau [1, 3]. Das heißt, ein zufällig entstandener längerer RNA-Strang hat eine nur sehr kurze Lebensdauer, da er sofort wieder in kurze Abschnitte zerteilt wird. Eine interessante Entdeckung in diesem Zusammenhang war, dass RNA-Moleküle zu längeren Strängen verbunden werden, wenn sie in einer Zelle mit thermischem Gradienten zirkulieren [4]. In einem Laborexperiment wurde die eine Seite einer wenige Millimeter starken Kapillare auf über 70 °C erwärmt, während die gegenüber liegende Seite gekühlt wurde, sodass ein Temperaturunterschied von über 30 °C auftrat. Während auf der wärmeren Seite ein Zerfall der Stränge erfolgte, kam es auf der kühleren Seite zu einer Kettenbildung [5].

Die Anbindung der Modellvorstellung an existierende natürliche Systeme gestaltet sich allerdings schwierig. Als ein Beispiel werden die Verhältnisse in den Mikrokanälen der „White Smoker“ angeführt, aus denen die höher temperierten Wässer aus der ozeanischen Kruste in das Meerwasser gelangen. Allerdings ist die Lösungsfracht der Wässer so hoch, dass die Kanälchen ständig durch kristallisierende Minerale abgedichtet werden, sodass sich die Wegsamkeiten fortwährend verlagern. Zudem sind die pH-Werte der austretenden Lösungen sehr hoch (s. Abschn. 5.6), sodass mögliche RNA-Moleküle schnell hydrolysiert werden.

Notwendig ist daher die Suche nach einem realistischen geologischen Umfeld für die Frühzeit der Erde, das über sehr lange Zeiträume konstante Bedingungen liefern konnte. Bislang im Labor in Experimenten entwickelte Ribozyme (katalytisch aktive RNA-Moleküle) hatten eine relativ hohe Fehlerquote bei der Reproduktion und es ließen sich nur sehr kurze Abschnitte reproduzieren [3].

Aber davon einmal abgesehen – auch wenn sich eine zufällig gebildete RNA beliebig oft kopiert, Kopierfehler bekommt und ständig (in Richtung einer verbesserten Katalyse) weiterentwickelt –, ist es ausgeschlossen, dass sie zufällig Enzyme katalysiert, die gleichzeitig bis zu 20 verschiedene Synthetasen bilden, die wiederum tRNAs so spezifisch beladen, dass daraus die Peptid-Maschinerie entstehen kann. Das ist das Huhn, welches aus dem Ei schlüpft, das es selbst gelegt hat.

## Literatur

1. Mills DR, Peterson RL, Spiegelman S (1967) An extracellular Darwinian experiment with a self-duplicating nucleic acid molecule. *Proc Natl Acad Sci USA* 58:217–224



2. Alberts B, Johnson A, Lewis J, Raff M, Roberts K, Walter P (2002) *Molecular biology of the cell*. Garland Science, New York
3. Szostak JW (2012) The eightfold path to non-enzymatic RNA replication. *J Syst Chem* 3:2
4. Kreysing M, Keil L, Lanzmich S, Braun D (2015) Heat flux across an open pore enables the continuous replication and selection of oligonucleotides towards increasing length. *Nat Chem* 7:203–208
5. Agerschou ED, Mast CB, Braun D (2017) Emergence of Life from trapped Nucleotides? Non-equilibrium-behavior of oligonucleotides in thermal gradients. *Synlett* 28(1):56–63



# 7

## Das neue Modell: Hydrothermale Systeme der frühen kontinentalen Kruste

### Inhaltsverzeichnis

7.1	Die kontinentale Kruste – zerbrechlich und gestört. ....	131
7.2	Überkritische Gase – Dampf unter Druck?. ....	142
7.3	Es gibt ihn doch: Ein Nachweis aus der Natur ....	152
7.4	Sie sind möglich: Experimente zum Krustenmodell ...	157
	Literatur .....	166

### 7.1 Die kontinentale Kruste – zerbrechlich und gestört

Der Start des Projektes zur Entstehung des Lebens war völlig anders als wir es für die bisherige Forschung kennengelernt hatten. Es gab keinen Wissenschaftler, der aufbrach, um das Leben in seinen Anfängen zu erkunden, keine Forschergruppe, die diese Fragestellung nach einem erfolgreichen Antrag hochfinanziert in einem Forschungsauftrag

zu bearbeiten hatte. Das Thema stolperte fast nebenbei herein, in eine Situation, die alles andere als mit der Suche nach der Entstehung des Lebens zu tun hatte. Die Frage, die ab einem bestimmten Zeitpunkt im Raum stand, war für mich: Welche Bedingungen herrschen in tektonischen Störungen? Es sind Bruchzonen in der Erdkruste bis zum Erdmantel, die heiße Wässer und Gase führen, in denen Minerale aus gelösten Stoffen kristallisiert werden und in denen Erdbeben losschlagen können. Es waren hügelbauende Waldameisen, die bei Kartierungen in der Eifel immer wieder auf solchen Störungen gefunden wurden und diese Frage auslösten. Das anschließende Sammeln von Fakten über gasoffene Bruchzonen führte neben geologisch bekannten Rahmenbedingungen zu Gasen wie Stickstoff, Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff, zu Phosphat und Schwefel und zu Bedingungen der Fischer-Tropsch-Synthese in hydrothermalen Systemen. Und plötzlich stand er da, der Wink mit dem Zaunpfahl, doch einmal über die Entstehung des Lebens nachzudenken ... Und so geschah es. Nach kurzer Suche fand sich, wie oben beschrieben, eine Gruppe von Naturwissenschaftlern der Universität Duisburg-Essen, die sich das Ziel setzte, die heutigen Verhältnisse an tektonischen Störungszonen auf die Anfangsphase der kontinentalen Krustenbildung zu übertragen und die Möglichkeiten chemischer Reaktionen mit Blick auf die Bildung organischer Moleküle zu überprüfen [1].

Die hydrothermalen Systeme der „Black Smoker“ und „White Smoker“ haben gezeigt, dass im Übergang von der dünnen ozeanischen Kruste zur Hydrosphäre ein temperaturgesteuerter Zirkulationsprozess besondere Voraussetzungen für ein eigenständiges Ökosystem schafft. Hydrothermale Quellen sind auch an Land interessante Lebensräume für hochangepasste Bakterien und Archaeen, die Temperaturen deutlich über 100 °C tolerieren. Die

hohen Temperaturen stehen zum Teil in Verbindung mit tiefreichenden Zirkulationen von Wässern, die an höheren Positionen der Gebirge versickern und über Bruchzonen mehrere Kilometer tief in die Erdkruste gelangen. Dort nehmen sie die Temperatur der Kruste an und werden durch nachströmendes Wasser wieder nach oben gedrückt. Liegt das Ende des Aufstiegsweges morphologisch tiefer als die Gebirgsregion, treten die Wasser selbstständig (artesisch) als heiße Quellen aus. In den meisten Fällen stammen die hohen Temperaturen jedoch aus der Nähe der Wässer zu magmatischen Aktivitäten. Es gibt Magmen, die in der Erdkruste bei ihrem Aufstieg in Magmakammern stecken bleiben und die überlagernde Kruste stark aufheizen. Oder sie schaffen es, durch Bruchzonen die komplette Kruste zu durchschlagen und Vulkane auszubilden. Je geringer die Abstände der Wässer zu dem heißen Gestein sind, desto stärker heizen sie sich auf. Beispiele hierfür sind der Yellowstone-Nationalpark der USA oder die Phlegräischen Felder in Süditalien mit ihren Geysiren und heißen Quellen. Mit größerer Distanz zu magmatisch aktiven Zonen verringert sich der Temperaturgradient in der Kruste. Er erreicht heute Durchschnittswerte, die im Kontinent ca. 30 °C Temperaturerhöhung pro Kilometer Tiefe betragen. In der frühen Phase der kontinentalen Krustenentwicklung waren die Temperaturen vielleicht doppelt so hoch, bedingt durch die höheren Anteile radioaktiver Isotope (Kalium [ $^{40}\text{K}$ ], Uran, Thorium), die mit ihrem Zerfall einen hohen Beitrag zur Temperaturerhöhung innerhalb der Erde leisteten.

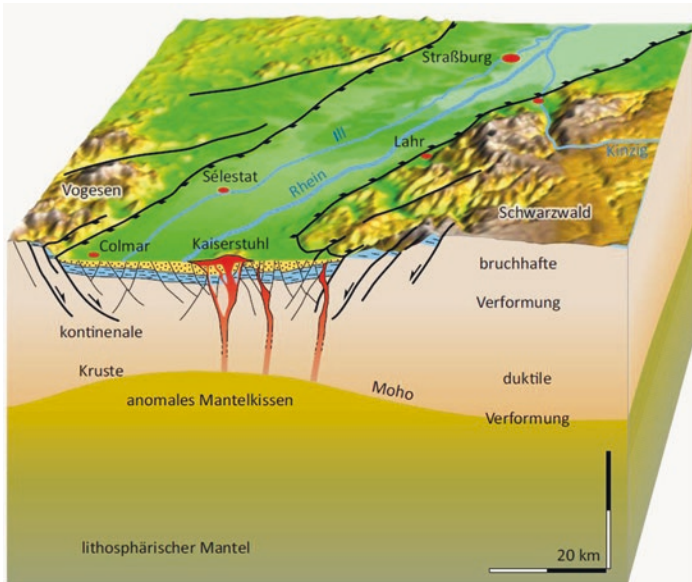
An dieser Stelle muss ich eine Sache besonders hervorheben. Es lassen sich viele hypothetische Modelle zur Entstehung des Lebens entwickeln und diskutieren. Eine Akzeptanz ist aber nur zu erreichen, wenn Laborversuche

einzelne Schritte der Hypothesen untermauern und sich so eine Theorie herausbildet. Von besonderem Wert ist es, wenn für das vorgeschlagene Modell Rahmenbedingungen angegeben werden, für die realistische physikalische Größen abgeschätzt werden können. Und genau das ist hier der Fall. Wir kennen den Druck in einer offenen Wassersäule, der unter Vernachlässigung des atmosphärischen Drucks früher genau gleich dem heutigen war. Er beträgt 1 bar pro 10 m. In 1000 m Tiefe herrschten seinerzeit auch in der jungen Kruste 100 bar und die Temperaturen lagen mit dem ca. doppelten Wert von heute bei vielleicht 50 bis 60 °C. Genau diese Informationen werden gebraucht, um im Labor Bedingungen der kontinentalen Kruste nachzustellen.

Wie in Abschn. 2.5 am Beispiel von Island beschrieben ist, lassen sich durch Überlagerung verschiedener Mantelprozesse große Mengen basaltischer Laven zu Inseln auftürmen, die nach einigen Millionen Jahren ein großflächiges Festland ergeben. Werden Teile dieser Gesteine wieder aufgeschmolzen, können sich neue Magmen mit einer völlig andere Zusammensetzung bilden. Die neuen Gesteinsschmelzen kristallisieren durch langsame Abkühlung zu einem Gestein, das mit Graniten verwandt ist. Granitische Gesteine haben eine geringere Dichte als Basalt und schwimmen quasi auf dem dichteren Untergrund des Erdmantels. Ihre fortwährende Bildung im Lauf der Erdgeschichte führte deshalb zu einer eigenständigen Kruste, die heute noch die Kernzonen der Kontinente bildet. Die Dichteunterschiede sind die Ursache dafür, dass die Kontinente höher als die ozeanische Kruste und sogar höher als der Meeresspiegel liegen. Und damit bekommen wir für die Frühphase der Erde eine neue Situation. Es gibt mit den ersten kleinen Kontinenten größere Bereiche, die über einem angenommenen Meeresspiegel liegen. Hierdurch erschließen sich neue Räume, die

Auswirkungen auf das beginnende Leben haben konnten. Weiterhin ist der Temperaturgradient in der kontinentalen Kruste deutlich kleiner als in der ozeanischen, während gleichzeitig die Mächtigkeit das Mehrfache beträgt. Hiermit verbunden ist ein viel weiter gespannter Druck- und Temperaturbereich über die vertikale Erstreckung, der für die Entwicklung organisch chemischer Moleküle zur Verfügung stand.

Wir bekommen durch Island somit eine Vorstellung, wie sich der Start der kontinentalen Krustenbildung vollzogen haben kann. Einige Hundert Millionen Jahre nach der Bildung der ersten basaltischen Kruste waren bereits größere Einheiten entstanden. Sobald die Urkontinente eine kritische Größe erreicht hatten, müssen durch Spannungen tektonische Bruchzonen entstanden sein. Ursache können zum Beispiel lokal verstärkte Ansammlungen von Magmen unter der Kruste an der Kruste-Mantel-Grenze gewesen sein. Hierdurch bildet sich eine Art Kissen, das die überlagernde Kruste in einem begrenzten Bereich aufwölbt. Sie wird gedehnt, reißt auf und bildet tiefreichende Störungen, an denen Gase und Magmen aufsteigen können. Ein rezent es Beispiel ist der südliche Oberrheingraben (Abb. 7.1). Ein Gebiet von ca. 400 km Durchmesser nordwestlich der Alpen wurde in den letzten 100 Mio. Jahren kontinuierlich angehoben und großflächig abgetragen. Durch die Aufwölbung kam es zur Dehnung, es entstanden Störungen, an denen der Oberrheingraben einbrach, während Schwarzwald und Vogesen weiter aufstiegen. Begleitet wurde diese Entwicklung von vulkanischer Aktivität, deren bekanntester Vertreter der Kaiserstuhl bei Freiburg ist. Hiermit haben wir bereits ein Bild vor Augen, das alle Voraussetzungen für die Bildung organisch-chemischer Moleküle in den Störungszonen einer kontinentalen Kruste beinhaltet.



**Abb. 7.1** Die Tektonik des südlichen Oberrheingrabens. Der Aufstieg heißeren Mantelmaterials und die Ansammlung in einem Mantelkissen führten zur Hebung der gesamten Kruste. Die hiermit verbundene Dehnung bildete den Oberrheingraben. (© Springer-Verlag GmbH [2], Abb. 13.10)

### Tektonische Störungen

Tektonische Störungen sind Bruchzonen in der Erdkruste, an denen Gesteinsschollen gegeneinanderbewegt werden. Es gibt drei Grundtypen, die unterschieden werden. Die erste erfolgt durch Dehnung der Kruste. Es bilden sich hierdurch Abschiebungen, an denen Schollen absinken, wie es zum Beispiel an den Rändern der Gräben geschieht. Bei einer Einengung werden die Schollen gegeneinandergedrückt, wodurch sich Aufschiebungen bilden. Hierbei wird ein Gesteinspaket über ein anderes hinweggeschoben. Diese beiden Störungstypen bilden im Normalfall keine Kanäle in die Tiefe, an denen Gase aufsteigen können. In großen Gräben überlagern sich zusätzliche Prozesse, die wie im Fall des Kaiserstuhls im südlichen Oberrhein-

graben Kanäle in die Tiefe öffnen. Die dritte Möglichkeit der Störungsbildung ist das Aufreißen der Kruste entlang von Seitenverschiebungen durch seitliches Verschieben der Krustenblöcke gegeneinander. Sie bilden vertikal stehende Bruchzonen, die bis in den Mantel reichen können. Prominentestes Beispiel ist die San-Andreas-Störung in den westlichen USA, an der der südwestliche Teil Kaliforniens gegenüber dem restlichen Kontinent nach Nordwesten verschoben wird. Der Mantel hatte in der Frühzeit aufgrund seiner höheren Temperatur eine stärker ausgeprägte Dynamik mit einer vermutlich stärkeren Konvektion als heute. Spannungen, die durch die Mantelbewegungen über Scherkräfte auf die Kruste übertragen wurden, können ausreichend für die Bildung von Seitenverschiebungen gewesen sein. Beim Verschieben der Krustenblöcke gegeneinander öffnen sich an gewellten Flächen Kanäle zur Tiefe, die die gesamte Kruste senkrecht durchziehen. Hier können Gase, Flüssigkeiten und Magmen aufsteigen.

Störungen treten immer in einem komplexen Netzwerk auf, sind miteinander verbunden, kreuzen sich und tauschen Stoffe aus. Sind sie geöffnet, führen sie Wasser. Aufsteigende Gase führen zu einem Transport von Komponenten und Wasser aus großer Tiefe. In Hochlagen der Gebirge versickerndes Wasser kann tief in die Kruste eindringen und an anderen Störungsbahnen artesisch aufsteigen. Ein wesentlicher Anteil der atmosphärischen Gase wurde von Beginn an durch derartige Störungszonen, die in ähnlicher Form auch in der ozeanischen Kruste auftreten, aus dem Mantel abgegeben. Aus ihnen lassen sich die Ausgangssubstanzen der organischen Chemie ableiten. Das bedeutet, dass die Rohstoffe für die biologische Entwicklung, bezogen auf das tektonische Störungsmodell, in einer unbegrenzten Menge zur Verfügung standen. Hierzu gehören Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickstoff, Wasserstoff, Ammoniak oder auch Schwefelverbindungen. Hinzu kommt Phosphat, das durch saure Wässer aus dem Mineral Apatit, einem Kalziumphosphat, herausgelöst werden konnte.

Eindeutige Belege für ehemals geöffnete Bereiche der Störungszonen sind zum Beispiel Gangerze, die durch Kristallisation von Metallsulfiden und Gangmineralen wie Quarz oder Kalkspat (Kalzit) verschlossen wurden (Abb. 7.2). Wiederholte Öffnungen und Zufuhr von Erzlösungen führten zu charakteristischen Wechseln von





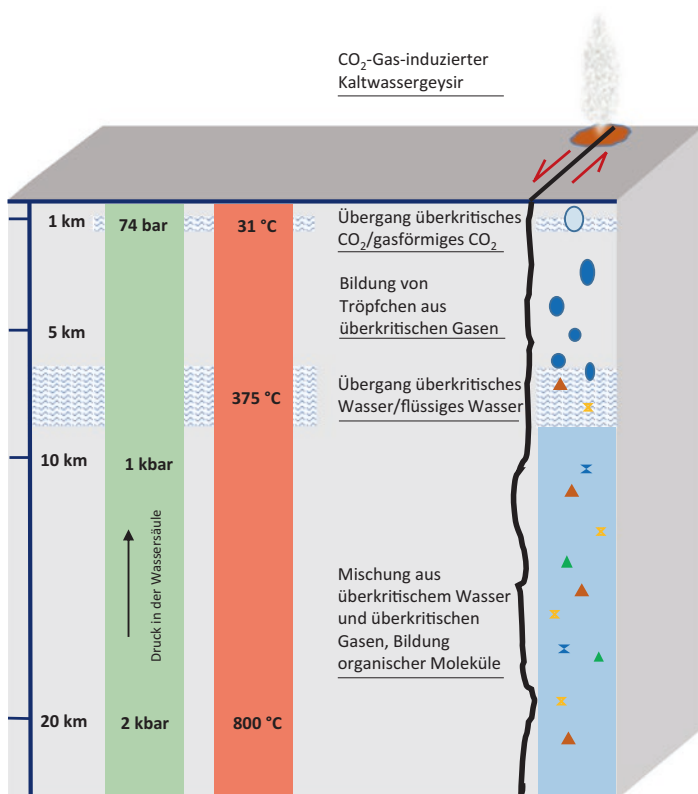
**Abb. 7.2** Gangerz mit Metallsulfiden (Zinkblende, Chalkopyrit), Gangmittel Calzit und etwas Quarz, Bad Grund/Harz

Erz und Gangmineralen, die spiegelbildlich auf beiden begrenzenden Seitenwänden kristallisierten. Diese Gangerze, die aus unterschiedlichsten Metallsulfiden wie Kupfer-, Eisen- oder Zinksulfid bestehen können, müssen von Beginn an in wasserführenden Störungszonen der kontinentalen Kruste gebildet worden sein. Es sind Dokumente für das reichhaltige Angebot metallischer Sulfide, die als Wandtapeten die Begrenzungsflächen der Störungen auskleideten. Hier lassen sich Pyrit und andere Metallsulfidoberflächen finden, die bei Wächtershäuser (s. Abschn. 5.4) eine Rolle für den Metabolismus spielten.

Und jetzt kommen wir zu den Eigenschaften einer offenen Störungszone, die eigentlich alles andere in den Hintergrund drängen. Sie ist bei ausreichender Zufuhr des

bekannten Gascocktails eine hochproduktive chemische Fabrik zur Herstellung organischer Moleküle (Abb. 7.3).

Sind die Verhältnisse in einer Störung so neu? Nur zum Teil. In der technischen Chemie werden mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese unter hohen Drucken und



**Abb. 7.3** Blockmodell der jungen kontinentalen Kruste mit bis zu doppelter geothermischer Tiefenstufe im Vergleich zu heute (heute 30 °C pro km). Rechts Darstellung der Fluidphasen in einer vertikalen Störungszone. Die bunten Symbole symbolisieren vor Ort gebildete organische Moleküle

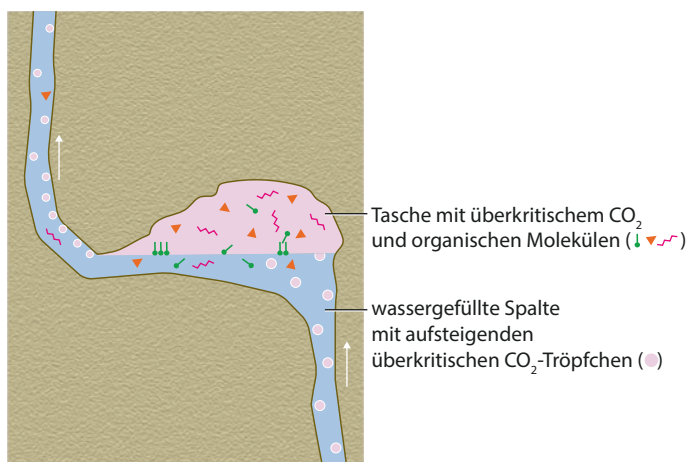
Temperaturen aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff langkettige organische Moleküle hergestellt (z. B. für Benzin). So erhält man bei Temperaturen von bis zu 300 °C und Drucken bis 25 bar (entspricht einer Wassertiefe von 240 m bei 1 bar Luftdruck) zum Beispiel Alkohole oder Methan, Propan oder noch komplexere Verbindungen. Hieraus lässt sich mit weiteren Reaktionsschritten eine Vielzahl von Kohlenwasserstoffketten herstellen, die für eine biologische Entwicklung erforderlich sind, unter anderem auch Molekülketten, die für den Aufbau einer Zellhülle benötigt werden. Verschiedene metallische Katalysatoren oder auch das Mineral Zeolith sorgen für eine hohe Ausbeute bei der Reaktion.

Und das ist genau das, was wir mit unserem kontinentalen Störungsmodell vor Augen hatten. Dort waren in der offenen Wassersäule von Beginn an eine Vielzahl von Druck- und Temperaturbedingungen vorhanden, die weit über das hinausgehen, was bei der Fischer-Tropsch-Synthese als Rahmen vorgegeben wird. Darüber hinaus war und ist auch heute noch das Angebot an Ausgangsstoffen und metallischen oder mineralischen Katalysatoren ungleich höher, wie das Beispiel der Gangerze zeigt. Die Begrenzungsflächen der Bruchzonen sind rau, verspringen häufig und bieten eine hohe Zahl an kleinen Vorsprüngen und Kavitäten, in denen sich aufsteigende Gase sammeln können (Abb. 7.4). Sie sind genau genommen kleine Mikroautoklaven in unendlicher Anzahl, wobei jeder Autoklav, der eine Art Dampfdrucktopf darstellt, seine ganz speziellen physikochemischen Bedingungen hat (Abb. 7.5). Jetzt lässt sich erahnen, welches Potential in einem derartigen Störungssystem steckt. Es ist fast für jede der wichtigsten organischen Verbindungen, die im Zuge der Lebensentstehung benötigt werden, ein Reaktionsgefäß vorhanden, das den passenden Druck und



**Abb. 7.4** Typischer Verlauf einer verspringenden Störung. Bei Wasserfüllung können in den Eckbereichen in Tiefen > 1000 m überkritische Gase gesammelt werden (Pfeile). Sie bilden in diesem Fall autoklavenähnliche Reaktionsräume. (Foto: Dr. Frederik Kirst)

die passende Temperatur für seine Synthese bereitstellt. Selbst der pH-Wert ist über die Mischungsverhältnisse der Gasanteile von  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  in gewissen Bereichen variierbar. Während ein hoher  $\text{CO}_2$ -Anteil unter Druck pH-Werte im sauren Bereich bis minimal 3,3 ergibt, kann durch Erhöhung des Stickstoffanteils der pH-Wert über 6 steigen. Sind höhere Konzentrationen von Schwefelverbindungen beteiligt, kann der pH-Wert niedriger als 3 werden.



**Abb. 7.5** Kavität (Mikroautoklav) in der kontinentalen Kruste mit Wasser, überkritischem (ük) CO<sub>2</sub> und organischen Molekülen

## 7.2 Überkritische Gase – Dampf unter Druck?

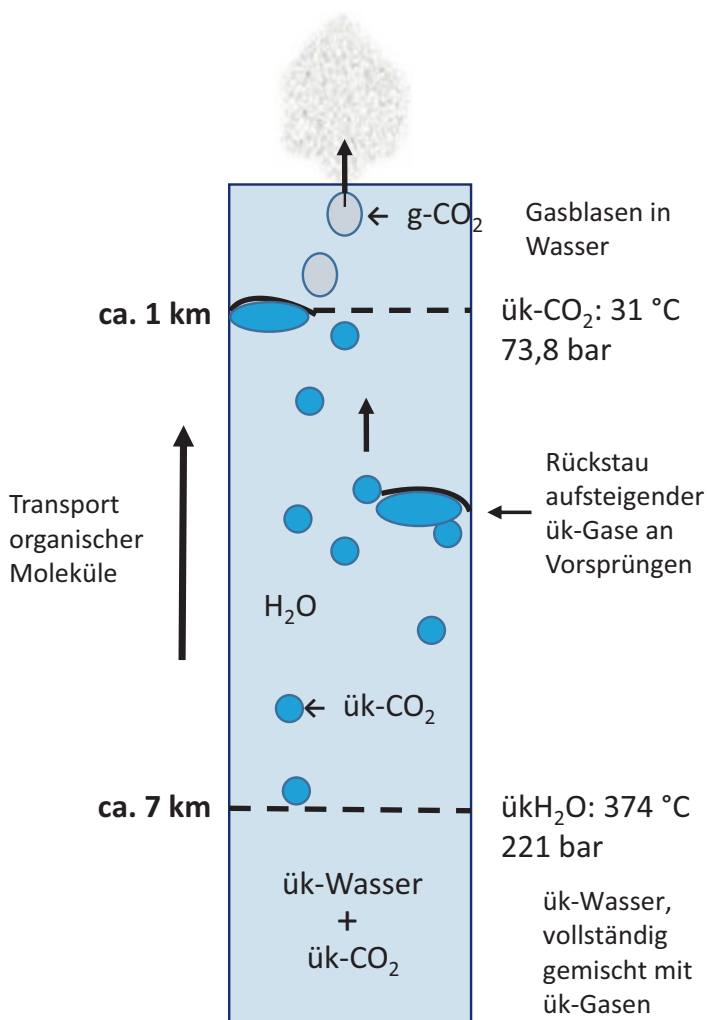
Es gibt im Leben eines forschenden Naturwissenschaftlers vielleicht eine, bei einigen wenigen mehrere, bei vielen gar keine persönlichen Sternstunden der Wissenschaft. Ich habe eine für mich definiert, ein fast banales Wissen, abgerufen aus dem Internet zu einem Zeitpunkt, an dem die Begeisterung für die Frage nach der Entstehung des Lebens in unserer Gruppe bereits einer gewissen Ernüchterung zu weichen drohte.

Gase nehmen ab einer spezifischen Temperatur und einem spezifischen Druck einen besonderen Phasenzustand ein. Sie werden überkritisch. Die Dichte überkritischer Gase beträgt etwa die Hälfte von der einer Flüssigkeit derselben Substanz. Für CO<sub>2</sub> findet der Übergang vom Gas zur überkritischen Phase bei etwa 31 °C und 74 bar statt.

Und da stand es so nebenbei im Internet:  $\text{CO}_2$  kann bei einer erhöhten Temperatur in der Kruste bereits in 740 m Tiefe überkritisch werden. Der Moment, abends nach 23 Uhr ist unvergessen. Übertragen auf eine offene Störung in der Kruste mit einer  $\text{CO}_2$ -gesättigten Wassersäule bedeutete dies für die junge Erde, dass ab etwa 740 m Tiefe der Übergang zum überkritischen  $\text{CO}_2$  stattgefunden haben musste (Abb. 7.6). Der damals herrschende Temperaturgradient hatte hierfür sicher ausgereicht. Heute liegt der Übergang bei der durchschnittlichen Temperaturzunahme von  $30^\circ\text{C}/\text{km}$  eher in Richtung der 1000-m-Marke. In vulkanisch aktiven Regionen wird die Temperatur von  $31^\circ\text{C}$  bereits in geringerer Tiefe erreicht. Maßgeblich für den Phasenwechsel ist dann der Druck.

Neben  $\text{CO}_2$  war auch Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) als Gas in der Frühphase der Erdentwicklung in der Kruste vorhanden. Wie jedes Gas kann auch  $\text{N}_2$  überkritisch werden. Dies geschieht ab einer kritischen Temperatur von  $-147^\circ\text{C}$  und einem kritischen Druck von 33,9 bar. Reines Stickstoffgas in einer gesättigten Wassersäule würde daher in ca. 340 m Tiefe in die überkritische Phase übergehen. Überkritische Gase sind untereinander unbegrenzt mischbar. Die Mischungen bekommen in Abhängigkeit der Konzentrationen der beteiligten Substanzen andere kritische Werte, die von den Einzelwerten der Gase abweichen. So ergeben sich bei einer Mischung von  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  Zwischenwerte, die anderen Tiefenbereichen des Phasenüberganges von überkritisch zu unterkritisch entsprechen.

Was für eine Entdeckung! Christian Mayer meinte am nächsten Tag nur, damit können wir jetzt alles machen. Es musste anscheinend erst ein vollständiges Bild über eine nicht direkt zugängliche Region entstehen, bevor die harten Daten Einzug halten konnten. Wir hatten von heute auf morgen eine Substanz für unsere Gedankenspiele zur



**Abb. 7.6** Schema einer Wassersäule in einer gaspermeablen Störungszone mit ca. zweifachem geothermischem Gradienten im Vergleich zu heute. Unterhalb von 7 km existiert ein Fluid aus überkritischem (ük) Wasser,  $\text{CO}_2$  (und  $\text{N}_2$ , nicht dargestellt). Darüber findet eine Trennung der überkritischen Gase vom jetzt flüssigen Wasser in Form von Tröpfchen statt. Ab ca. 1000 m bis zur Oberfläche liegt Gas neben Wasser vor ( $\text{g-CO}_2$ )

Verfügung, die alles zurück auf Los setzte. Es geht um Folgendes (wobei zur Vereinfachung nachfolgend nur das reine  $\text{CO}_2$  und keine Mischung mit anderen Gasen betrachtet werden):

Im überkritischen Zustand verhält sich  $\text{CO}_2$  wie ein organisches Lösungsmittel, das gleichzeitig eine sehr niedrige Oberflächenspannung besitzt. In ihm können unpolare organische Substanzen gelöst werden, die im Wasser nicht löslich sind. Diese Eigenschaft macht man sich in der sogenannten „Grünen Chemie“ zu Nutze. Bestes Beispiel ist das Entkoffeinieren von Kaffeebohnen. Sie werden unter Druck mit überkritischem  $\text{CO}_2$  gespült, wobei das Coffein herausgelöst wird. Anschließend wird der Druck abgesenkt, bis das überkritische  $\text{CO}_2$  in Gas übergeht. Das ist der Moment, in dem das im  $\text{CO}_2$  gelöste Coffein ausfällt. Es kann aufgefangen und anderweitig genutzt werden. Im Gegensatz zu flüssigen organischen Lösungsmitteln bleiben keine Rückstände in den Kaffeebohnen zurück. Zusammen mit Wasser bildet das überkritische  $\text{CO}_2$  ein Nebeneinander von zwei Lösungsmitteln, ein sogenanntes Zweiphasensystem, das eine ganz eigene Klasse von chemischen Reaktionen ermöglicht.

Das gab es vorher noch nicht: ein Modell zu Entstehung des Lebens, bei dem ein organisches Lösungsmittel eine Rolle spielte. Hiermit lassen sich plötzlich Reaktionen diskutieren, die im Wasser unmöglich ablaufen konnten, aber notwendig für viele Schritte auf dem Weg zum Leben waren. Das hieß, wir konnten die Störungszonen der ersten kontinentalen Kruste noch einmal mit anderen Augen betrachten. Folgende Szenarien standen jetzt zur Verfügung: Mit der Bildung der Erde gelangten durch das Aufeinandertreffen der kosmischen Partikel auch große Mengen  $\text{CO}_2$  in den Erdmantel. Der setzte während der Abkühlung große Volumina von im Magma gelöstem  $\text{CO}_2$  frei. Die Ursache hierfür war und



ist auch heute noch die abkühlungsbedingte Kristallisation von typischen Mantelmineralen wie Olivin oder Pyroxen, die kein  $\text{CO}_2$  in ihr Kristallgitter einbauen können. Hierdurch reichern sich die Gase gelöst in der Restschmelze an, bis sie sich in einer eigenständigen Phase (überkritisch) abtrennen. Die Dichte überkritischer Gase ist deutlich geringer als die des Mantels, der aus einer Mischung von Mineralen und Gesteinsschmelze besteht. Das  $\text{CO}_2$  bildet Tröpfchen und Schlieren, die ab einer ausreichenden Menge durch den Mantel aufsteigen. Sie mischen sich je nach Vorkommen mit überkritischem Wasser und anderen Gasen und reichern sich in den obersten Regionen des Mantels an. In der Frühzeit der Erde stoppte der Aufstieg an der Grenze zur kontinentalen Kruste, die eine Barriere bildete. Hatten sich aber Störungszonen ausgebildet, die die gesamte Kruste bis in den oberen Mantel durchschlugen, konnte das  $\text{CO}_2$  in Kanälen der Störungen bis zur Oberfläche aufsteigen (dieser Vorgang findet auch heute noch in abgeschwächter Intensität statt).

Die Sache ist noch ein klein wenig komplexer, als ich sie bis hier beschrieben habe. Aber das kommt uns sehr entgegen. Es ist einfach nur beeindruckend zu sehen, welche Möglichkeiten das System Störungzone in der Kruste bereithält. Oben habe ich ausgeführt, dass überkritische Phasen, also die beschriebenen Gase, sich unbegrenzt mischen, so wie es auch die unterkritischen Gase tun. Ein Beispiel ist die Luft. Hier sind Sauerstoff und Stickstoff perfekt gemischt. Jetzt ist aber auch Wasser in der Störungzone mit im Spiel. Es hat wie fast alle Stoffe die Phasenzustände fest, flüssig und gasförmig – Eis, Wasser, Wasserdampf. Und es hat eine überkritische Phase, die, von den Druck- und Temperaturverhältnissen ausgehend, den Bedingungen der unteren Erdkruste entspricht, genauer, ab  $374,12^\circ\text{C}$  und 221 bar (2210 m offene Wassersäule). Das bedeutet, dass heute je nach

Temperatur der Kruste Wasser in seiner flüssigen Form erst oberhalb von ca. 13 km Tiefe in einer offenen Wassersäule auftritt. Bei der heißeren Kruste der jungen Erde lag die Grenze höher, vielleicht bei 8 km Krustentiefe. Darunter war Wasser überkritisch und hat sich mit den ebenfalls überkritischen Gasen vollständig gemischt. Und jetzt lohnt es sich, die Grenze von überkritischem Wasser zu unterkritischem genauer anzusehen. Während das Wasser im Übergang durch abnehmende Temperatur flüssig wird, bleiben die Gase weiterhin überkritisch und entmischen sich. Das heißt, sie bilden Tröpfchen aus überkritischem Gas, die in der Wassersäule aufsteigen. Das gelingt, weil sie eine geringere Dichte als das jetzt flüssige Wasser haben. Sobald die Wassersäule an  $\text{CO}_2$  gesättigt ist, schaffen die Tropfen es, bis ganz nach oben aufzusteigen, ohne gelöst zu werden. Es ist, als öffne man eine Sprudelflasche, in der sich sofort Blasen bilden und zum Ausgang strömen.

Mit diesem Bild vor Augen drängt sich eine weitreichende Folgerung auf. Wir haben die vielen kleinen Reaktionsräume, unsere Mikroautoklaven, kennengelernt, in denen über die ganze Vertikale der Kruste hinweg unterschiedlichste organische Moleküle gebildet werden können. Und wir haben mit dem überkritischen  $\text{CO}_2$  ein organisches Lösungsmittel, das alle Stoffe aufnimmt, die sich nicht im Wasser lösen. Es sind also ideale Voraussetzungen, die die überkritischen Gaströpfchen mitbringen. Sie bewegen sich durch die ganze Kruste und sammeln bestimmte Moleküle ein. Gleichzeitig erzeugen sie eine leichte Wasserströmung, durch die andere im Wasser gelöste Moleküle transportiert werden. Sammeln sich die  $\text{CO}_2$ -Tropfen auf der Reise nach oben in Kavitäten und Vorsprüngen der Störungszone, entstehen jedes Mal kleine Reaktionskammern, die in zwei unterschiedliche Phasen getrennt sind. Im Dachbereich bleibt überkritisches  $\text{CO}_2$  hängen und darunter befindet sich

stillstehendes oder leicht strömendes Wasser. Das Wasser enthält neben wasserlöslichen organischen Molekülen unterschiedliche Konzentrationen gelöster Salze, die im überkritischen  $\text{CO}_2$  nicht gelöst werden können.

Und jetzt wird wieder ein großer Vorteil des Systems deutlich: In dem überkritischen  $\text{CO}_2$  und besonders an der Grenzfläche zum Wasser sind Reaktionen möglich, die im Wasser allein nicht stattfinden würden. Dort können wasserlösliche mit wasserunlöslichen Stoffen reagieren und so Komponenten bilden, welche Membranen aufzubauen vermögen. Darüber hinaus werden Reaktionen begünstigt, bei denen ein Wassermolekül während der Verknüpfung abgegeben wird (Kondensationsreaktion), also z. B. bei der Reaktion von Aminosäuren untereinander zu Peptiden, den Aminosäureketten.

### **Der nächste Schritt, der Entscheidende**

Zwischen 1000 und 750 m Tiefe vollzieht sich auf dem Weg nach oben der nächste Schritt, der sich für uns nach und nach als der entscheidende für die Entwicklung des Lebens herausgestellt hat. Je nach Temperatur und Dichte der obersten Wassersäule, die abhängig von der Anzahl der aufsteigenden Gasbläschen ist, werden die überkritischen  $\text{CO}_2$ -Tröpfchen unterkritisch. Das heißt, es entsteht  $\text{CO}_2$ -Gas, das in Blasenzügen durch das Wasser an die Oberfläche perlt. Der neue Zustand des  $\text{CO}_2$  als Gas verhindert, dass organische Bestandteile in Lösung gehalten werden können, genau wie für das Coffein beschrieben. Die Substanzen fallen aus und konzentrieren sich in der verbliebenen wässrigen Lösung, aber auch bevorzugt an der Grenzfläche von Wasser zu Gas, das jetzt in den kleinen Autoklaven etwas oberhalb der Grenzzone als neue Kombination vorliegt.

Es gab in den Frühzeiten der Erde, wie auch zum Teil heute noch, einen Tiefenbereich unterhalb von ca. 800 m,

in dem in den Mikroautoklaven ein ständiger Wechsel von überkritischem zu unterkritischem Gas erfolgte. Ursache hierfür waren zyklische Druckschwankungen, die täglich durch Erdgezeiten oder Gaseruptionen an sogenannten Kaltwassergeysiren stattfanden. Der Mond befand sich in der Zeit, als die Lebensentwicklung begann, wesentlich näher an der Erde als heute. Die Auswirkungen waren beträchtlich. In den Ozeanen entwickelten sich gewaltige Gezeitenwellen, die weite Bereiche der ersten Festlandgebiete überfluteten. Aber nicht nur Wassermassen werden vom Mond angezogen. Auch die feste Erdkruste kann sich den Anziehungskräften des Mondes nicht widersetzen. Noch heute gibt es Regionen, in denen zwei Mal am Tag Hebungen und Senkungen des Standortes um bis zu 40 cm stattfinden. Wie bei den Wassermassen waren die Anziehungskräfte auch auf die Kruste zu Beginn wesentlich stärker. Die Folge waren zyklische Druckschwankungen, die sich direkt auf die Grenzzone des Phasenübergangs überkritisch bzw. unterkritisch auswirkten. Die Dimension dieser Verschiebung lag vermutlich in einer Größenordnung von wenigen Metern. Anders bei den Gaseruptionen, die wie bei den heißen Geysiren täglich in einer größeren Anzahl stattgefunden haben können. Ein rezent es Beispiel ist der Wallenborn in der vulkanischen Westeifel, ein durch  $\text{CO}_2$  getriebener Kaltwassergeysir, der in etwa alle 30 bis 35 min. ausbricht (Abb. 7.7). Je nach Intensität des Ausbruchs, bei dem viel Wasser bis zu einer Höhe von vier Metern mitgerissen wird, wird die Drucksäule in die Tiefe entlastet, einerseits durch das herausgeschleuderte Wasser, andererseits durch die hohe Anzahl an Gasblasen in der Wassersäule oberhalb der Grenzzone, die die Dichte der Wasser-Gas-Mischung herabsetzen. Nimmt der Druck in der Tiefe ab, kann in den letzten Kavernen unterhalb der Grenze der überkritische Zustand nicht mehr aufrechterhalten werden.



**Abb. 7.7** Kaltwassergeysir Wallenborn, Westeifel. CO<sub>2</sub>-getriebener Ausstoß von Wasser bis zu einer Höhe von 4 m ca. alle 30 bis 35 min

Es erfolgt eine turbulente Entgasung, die sich so lange in die Tiefe fortsetzt, bis der Grenzdruck zum überkritischen Zustand nicht mehr unterschritten wird. Der Wechsel zwischen den beiden Zuständen kann sich in einem Abschnitt von mehreren Hundert Metern abspielen. Anschließend läuft das ausgeworfene Wasser wieder zurück, wodurch sich der Druck erneut aufbaut.

Wir erkennen folglich einen neuen wichtigen Schritt, der gleich ein Problem in der Diskussion um die Entstehung des Lebens löst: die erforderliche hohe Konzentration von organischen Molekülen. Sie werden aus der Tiefe

herantransportiert, reagieren unterwegs zum Teil miteinander und werden in einer bestimmten Grenzzone fallen gelassen. Hier öffnet sich gedanklich sofort ein Raum, den wir unmittelbar mit unendlich vielen Reaktionen in Verbindung bringen können. Es ist naheliegend, hierin die Ausgangsbedingungen für die Bildung der ersten Zelle zu vermuten. Heute lassen sich auf Grundlage der neuen Erkenntnisse Versuche durchführen, die auf allgemeingültigen physikochemischen Gesetzmäßigkeiten beruhen und sich auf realistische Parameter stützen. Das Spannende hierbei ist, dass auch heute noch in der Tiefe von Kohlenstoffdioxidquellen Prozesse in ähnlicher Form ablaufen. Nur sehen wir deren Ergebnisse nicht, weil die mikrobiologischen Aktivitäten alle Informationen hierzu überdecken. Aber dazu noch ein paar Gedanken im letzten Kapitel.

Unsere Begeisterung für das Modell der Störungszone in der kontinentalen Kruste wird verständlich, wenn alle günstigen Faktoren für eine Biogenese zusammengetragen und gewichtet werden. Die Störungszonen mit Kontakt zum Erdmantel bieten ideale Voraussetzungen für organisch-chemische Reaktionen. Alle erforderlichen Ausgangsstoffe sind durch die kontinuierliche Ausgasung der Erde und Zersetzung von Mineralen in großer Menge und über sehr lange Zeiträume verfügbar. Sie können in unterschiedlichen Tiefen mit unterschiedlichen Druck- und Temperaturbedingungen und pH-Werten zu größeren Molekülen reagieren, mit aufsteigenden Fluiden transportiert und in einer schmalen Zone konzentriert werden. Durch Experimente von Kollegen aus verschiedenen Ländern ist bereits belegt, dass sich die für das Leben wichtigen Bausteine wie Lipide, Aminosäuren und organische Basen unter hydrothermalen Bedingungen bilden können [3]. Von Vorteil ist weiterhin, dass die Verhältnisse über sehr lange Zeiträume, viele Millionen Jahre, stabil sind,

keine zerstörerische UV-Strahlung oder Plasmapartikel aus dem Sonnenwind auftreffen und Meteoriteneinschläge geringen Einfluss haben – Bedingungen, die man an der Erdoberfläche vergeblich sucht. Aus dem Aufstieg von überkritischen Gasen und zyklischen Druckschwankungen lassen sich darüber hinaus Energie- und Entropiegewinne erzielen, die als Motor für die beginnende Lebensentwicklung Pate stehen. Es liegt nahe, dass mit Kenntnis dieser relativ gut definierten Rahmenbedingungen Experimente durchgeführt werden können, die Zugang zu einzelnen Entwicklungsschritten bei der Entstehung des Lebens ermöglichen.

## **7.3 Es gibt ihn doch: Ein Nachweis aus der Natur**

Es war wieder einer dieser Geistesblitze, der durch die abendliche Runde schoss. Vielleicht waren es die Spaghetti in der übervollen Schüssel, die ich an meinen Tischnachbarn weiterreichte, nachdem ich sie als Erster überreicht bekommen hatte. Einer von uns hatte sie gekocht. Ich war etwas früher zum Treffen gekommen und hatte gerade die Küche betreten, als der Kollege einen nicht unbeträchtlichen Teil der Pasta aus dem Ausguss zog, kurz abspülte und auf die Hauptmenge in der Schüssel legte. Sie waren, wie nicht selten bei dieser Prozedur, beim Abgießen über das Ziel hinausgeschossen.

Etwas, das aus einem in die Tiefe führenden Kanal kam, musste doch Spuren von dort unten enthalten. Und wie war das mit unserer kontinentalen Kruste? Wenn wir schon so klare Vorstellungen von den Verhältnissen dort hatten – sollte es dafür nicht auch Belege in der Natur geben, die uns unsere Überlegungen bestätigten? Schnell

war klar, dass es durchaus Dokumente geben konnte. Man musste nur die richtigen Gesteine beziehungsweise Minerale mit entsprechend hohen Altern finden, die aus den betreffenden Störungen stammten.

In den Störungszonen der Erdkruste kristallisieren aus hydrothermalen Lösungen verschiedene Minerale aus, wie z. B. Quarz, der mit genügend Raum zum Wachsen gut ausgebildete Bergkristalle bildet. Sind die Kristalle milchig trüb, dann enthalten sie Flüssigkeitseinschlüsse, die ohne nachfolgende Überprägung aus dem Wasser-Gas-Gemisch bestehen, wie es zur Zeit des Wachstums in der Störungszone vorhanden war. Aus dieser Beschreibung wird deutlich, dass es „eingefrorene“ Dokumente über die Chemie der wässrigen Anteile in hydrothermalen Quarzen geben muss, die aus der Zeit stammen, in der sie kristallisiert sind. Und wenn organische Chemie in den Flüssigkeiten beteiligt war, sollte sie zu bestimmen sein. Je älter die Quarze sind, desto mehr nähert man sich der Zeit, in der es noch keine biologische Aktivität an der Erdoberfläche gab, und desto eher hat man eine Chance, die primär anorganische Chemie zu identifizieren, die zu organischen Produkten geführt hat.

War das nicht eine große Chance? Sollte es gelingen, in Flüssigkeitseinschlüssen hydrothermal gebildeter alter Quarze organische Chemie zu finden, so käme das einer Sensation gleich. Nicht nur, dass wir Hinweise auf die Zusammensetzung Milliarden Jahre alter organischer Chemie bekämen – die Funde könnten auch gleichzeitig die Hypothese untermauern, dass der Beginn des Lebens in der oberen Erdkruste gelegen hat.

Diese Überlegungen führten zu einem spontanen Entschluss. Es musste möglich sein, Quarzminerale aus alten Kontinentkernen zu finden, die vor Milliarden Jahren in hydrothermalen Spalten kristallisierten und die Zusammensetzung der Wässer in ihren Einschlüssen



bis heute aufbewahrt haben. Die Suche nach zugänglichen Regionen mit präkambrischen Quarzgangvorkommen führte schließlich nach Westaustralien, in die Region der Jack Hills, 900 km nördlich von Perth. Hier verlaufen harte Quarzgänge wie zerfallene Mauerreste geradlinig durch die Landschaft (s. Abb. 7.8). Ihr Alter ist jünger als 2 Mrd. Jahre, sodass eine Kontamination der hydrothermalen Wasser durch biologisches Material, das es seit mehr als 3 Mrd. Jahren gibt, nicht ausgeschlossen werden kann. Trotzdem wurden sie während zwei Geländekampagnen beprobt, um die grundsätzliche Frage nach einer Konservierung organischer Substanz in



**Abb. 7.8** Quarzgang in Westaustralien

den Flüssigkeitseinschlüssen zu klären. Besonders interessant waren darüber hinaus Quarzgerölle eines Sedimentgesteins (Konglomerat), das in einer 2,7 Mrd. Jahre alten Schichtenfolge der Jack Hills in Westaustralien vorkommt (Abb. 7.9). In diesem Sedimentgestein wurden bereits die ältesten Zirkonminerale der Erde mit einem Alter von 4,3 Mrd. Jahren gefunden [4]. Die Zirkone sind wie alle anderen Komponenten eines Sediments an anderer Stelle entstanden, später durch die Erosion freigelegt und zum Ort der Ablagerung transportiert worden, genauso wie auch die einzelnen Quarzgerölle in dem Konglomerat, deren Alter aber nicht näher bestimmbar ist. Sie können aus Restlösungen bei der Kristallisation granitischer Magmen stammen, dann sind sie nicht von Interesse, oder aus hydrothermalen Spaltensystemen der Kruste. Bei den als hydrothermal identifizierten Quarzen der Jack Hills bestand die Chance, dass neben wenig mehr als 3 Mrd. Jahre alten Geröllen auch solche dabei waren, die noch



**Abb. 7.9** Konglomerat aus den Jack Hills, Westaustralien

vor dem Auftreten von LUCA in den Spalten der ersten Kontinente kristallisierten, vielleicht vor mehr als 4 Mrd. Jahren, und erst später freigelegt, abgetragen und beim Transport gerundet wurden.

Die Analysen der Flüssigkeitseinschlüsse in den hydrothermalen Quarzen wurden von den Arbeitsgruppen von Oliver Schmitz (Applied Analytical Chemistry, Universität Duisburg-Essen), Heinfried Schöler und Frank Keppler (beide Universität Heidelberg) durchgeführt [5]. Sie brachten eine Überraschung, ein Ergebnis, das wir in dieser Deutlichkeit nicht erwartet hatten. Die Daten von einem der 20 beprobten Quarzgänge sowie von den Quarzgeröllen aus den Jack Hills lieferten den Beleg für das Vorhandensein einer reichhaltigen organischen Chemie in den frühzeitlichen hydrothermalen Systemen der Erdkruste. Die Einschlüsse enthielten langkettige und kleinere organische Moleküle, die in ähnlicher Form auch im Stoffwechsel einer lebenden Zelle auftreten. Um eine nachfolgende Kontamination durch jüngere Wässer mit biologischen Molekülen auszuschließen, wurde Methan als Hauptvertreter der organischen Verbindungen auf seine Isotopenzusammensetzung untersucht. Es gibt z. B. unterschiedlich schwere Isotope des Kohlenstoffs, die stabil sind und nicht zerfallen. Es sind die  $^{13}\text{C}$ - und  $^{12}\text{C}$ -Isotope, die in einem bestimmten Verhältnis in Abhängigkeit von der Kohlenstoffquelle vorkommen. Durch Stoffwechselprozesse, die eher das leichtere Isotop verwenden, verschiebt sich das Verhältnis entsprechend zu leichteren Werten. Hiermit lassen sich Einflüsse biologischer Prozesse erkennen. Die analysierten Isotopenverhältnisse des Methans aus den untersuchten Proben haben gezeigt, dass es aus abiotischer Quelle stammt.

Vielleicht war es Zufall, dass Proben in den Jack Hills genommen wurden, die genau die Verhältnisse eines hydrothermalen Störungsumfelds mit einer reichhaltigen

Ausstattung organischer Moleküle anzeigen. Vielleicht sind aber auch ohnehin die meisten der Gerölle mit einer vergleichbaren Chemie ausgestattet. Weitere Probennahme und Analysen werden zeigen, ob noch weit mehr Informationen aus den Quarzen gewonnen werden können. Die Flüssigkeitseinschlüsse besitzen eine erstaunlich vielfältige Zusammensetzung, die zum Teil noch deutliche Fragen aufwirft. Ihre Analysenergebnisse besitzen für weitere Überlegungen und vor allem für die Experimente im Labor einen hohen Wert. Es liegen damit Informationen über reale Zusammensetzungen vor, die gezielte Experimente unter realistischen Bedingungen möglich machen. Durch sie werden bestimmte Schritte des Modells überprüfbar – eine Möglichkeit, an die in den bisherigen Modellvorstellungen nicht zu denken war.

## 7.4 Sie sind möglich: Experimente zum Krustenmodell

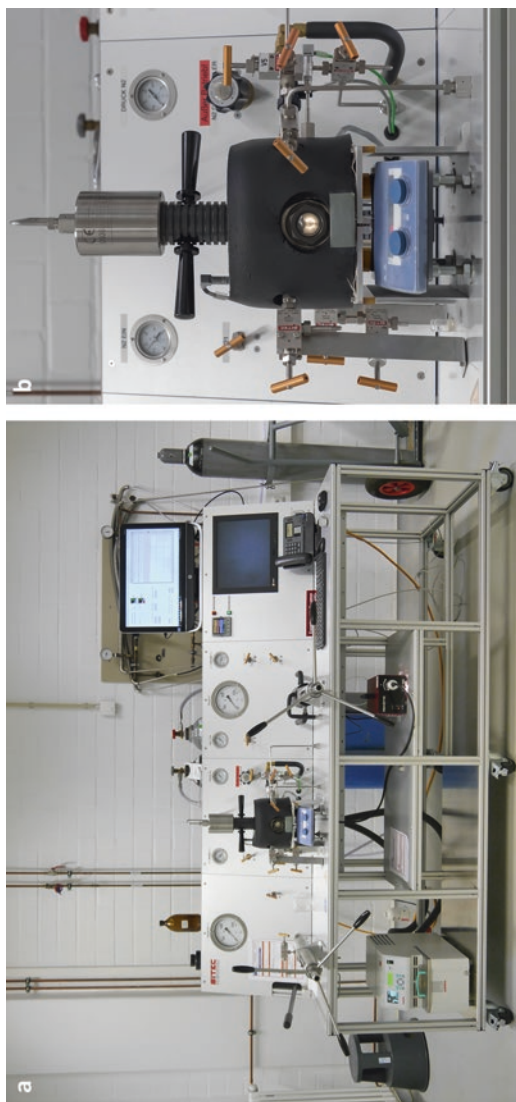
Die Zeit war reif für Experimente. Jedes hypothetische Modell bleibt so lange eine Hypothese, bis Detailschritte durch plausible Experimente nachvollzogen werden können. Die Diskussionen über unser hypothetisches Modell waren gut und schön und weit gediehen, aber ohne harte Daten aus Experimenten kam langsam das Gefühl auf, früher oder später in eine Sackgasse zu laufen. Und es gibt sie ja, die Gerätschaften, die Reaktionskammern haben, mit denen sich die Bedingungen der oberen kontinentalen Kruste simulieren lassen. Es war eine besondere Zeit, in der ich es wagte, eine Hochdruckanlage anzuschaffen. Ich glaubte das Geld zu haben. Ein Nebel aus der Umstellung des Verwaltungsprogramms der Universität verschleierte die wahre Situation. Es war gut so. Ohne Nebel kein Gerät.

Mit der Hochdruckanlage konnten wir endlich Versuche durchführen, mit realen Parametern und Substanzen, die uns realistisch erschienen. Die Informationen über die Rahmenbedingungen, die für die Experimente erforderlich waren, konnten aufgrund der heute noch existierenden Verhältnisse in der Erdkruste direkt von dort übernommen werden. So war es möglich, Wasser und Gase unter variierende Druck- und Temperaturbedingungen zu setzen, die natürlichen Verhältnissen entsprachen. Für die Reaktionen wurden spezifische Moleküle hinzugegeben, die aus hydrothermalen Systemen bereits bekannt waren. Für Letztere waren die Analyseergebnisse aus den Flüssigkeitseinschlüssen der australischen Quarze äußerst wertvoll.

### **Zum Gerät**

Mit der Anlage lassen sich in einer Reaktionskammer Bedingungen simulieren, wie sie in den obersten 10 km der kontinentalen Kruste auftreten (Abb. 7.10). Die Kammer hat ein Volumen von 50 ml. Sie wird für die Experimente zur einen Hälfte mit Wasser befüllt und zur anderen mit  $\text{CO}_2$ , das bis in den überkritischen Zustand komprimiert wird. Hineingegeben werden organische Moleküle wie Fettsäuren, Aminosäuren oder RNA-Bausteine, je nach Fragestellung.

Mit den ersten, von Christian Mayer konzipierten Versuchen in der Anlage gelang gleich ein Schlüsselerperiment, das für die weiteren Betrachtungen einen Durchbruch bedeutete. Eine bislang ungeklärte Frage war die Bildung der Vesikel unter präbiotischen Bedingungen, die letztlich die Grundlage einer Zelle bedeutet. Sie vereint alle Komponenten, die zur Reproduktion erforderlich sind, in einem Kompartiment. Wir hatten konkrete Vorstellungen davon, wie sich die Bildung von Vesikeln in



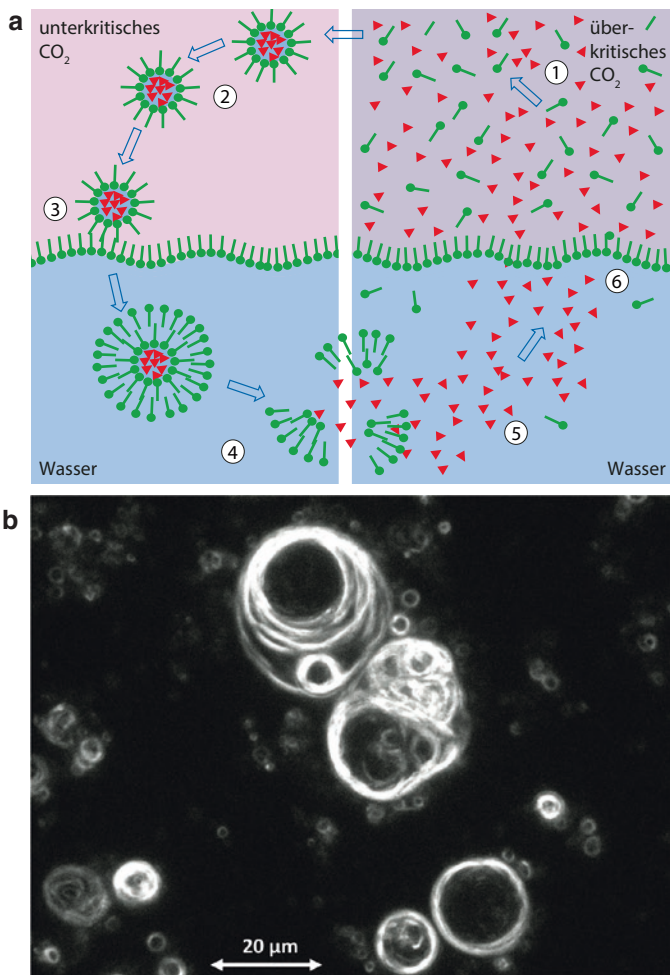
**Abb. 7.10** a Hochdruckanlage, Druckaufbau über rechte Spindel, isolierte Druckkammer in Schwarz. Über eine elektronische Steuerung können Druckschwankungen mit beliebig langen Abständen eingestellt werden, die natürliche Geysireruptionen simulieren. b Druckkammer mit Glasfenster zum Reaktionsraum. (Fotos: Yildiz Danisan)

der Störungszone vollziehen könnte. Die Simulation der Verhältnisse in der Hochdruckkammer war einfach. Eine Mischung aus langkettigen Aminen und Fettsäuren, wie sie aus den in den Flüssigkeitseinschlüssen der hydrothermalen Quarze gefundenen Bausteinen gebildet werden können, wurde in die Reaktionskammer überführt und über einen Zeitraum von 24 h unter Temperaturen und Drucken der oberen Kruste gehalten. Mit einem gesteuerten Druckverlust wechselte das vorher überkritische  $\text{CO}_2$  in den gasförmigen Zustand (Abb. 7.11a, Schritte 1 und 2).

Im überkritischen  $\text{CO}_2$  ( $\text{ükCO}_2$ ) ist immer ein geringer Prozentsatz an Wasser gelöst. Dieses Wasser bekommt beim Wechsel des  $\text{ükCO}_2$  zur Gasphase während des Druckabfalls genau die gleichen Probleme wie die ebenfalls gelösten organischen Substanzen. Es muss sich in irgendeiner Form sammeln, weil es in dieser Konzentration nicht in der neu entstehenden Gasphase aufgenommen werden kann. Das Ergebnis ist die Kondensation zu kleinen Tröpfchen, sobald der Druck abnimmt.

Während des Experiments bildete sich wie erwartet Nebel, der in dem jetzt gasgefüllten Teil des Autoklaven durch ein Fenster gut sichtbar wurde. Die Nebeltropfen sind anscheinend das Medium, das die organischen Moleküle spontan als Zufluchtsort erkennen. Obwohl sie sich unter anderen Bedingungen bevorzugt vom Wasser fernhalten, bleibt ihnen durch den Phasenwechsel nichts anderes übrig, als in und auf den Tröpfchen Platz zu nehmen. In der Folge sind die Wassertröpfchen mit organischen Molekülen hochbeladen. Salze, wie sie normalerweise gelöst im Wasser der Störungszone auftreten, finden sich hierin nicht. In dieser Beziehung entsprechen die Tröpfchen destilliertem Wasser.





**Abb. 7.11** Vesikelbildung im Grenzbereich zwischen überkritischem  $\text{CO}_2$  und  $\text{CO}_2$ -Gas ( $\text{gCO}_2$ ) [4]. **a** Zyklus der Phasenübergänge, beginnend mit überkritischem  $\text{CO}_2$  in einer Kavität (1). **b** Mikroskopische Aufnahmen (Dunkelfeld) von Vesikeln, z. T. mehrere ineinander geschachtelt. (Foto: Dr. Maria Davila Garvin)



### Was passierte weiter?

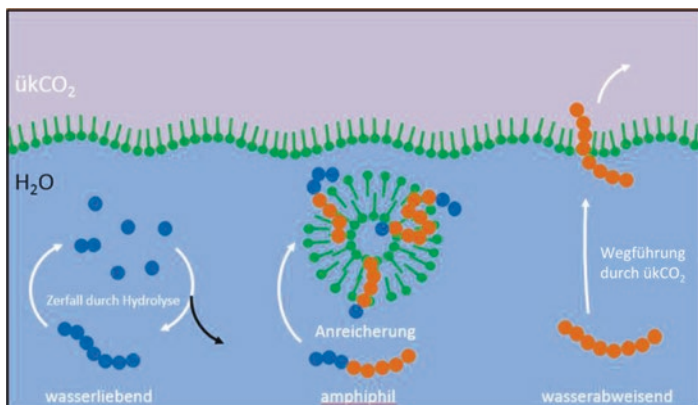
Es erfolgte ein Schritt, der uns ein großes Stück näher an das Verständnis heranführte, wie ein Vesikel, ein Vorläufer einer Zelle unter den Bedingungen der jungen Erde, entstanden sein konnte. Die Amine und Fettsäuren (Lipide) bildeten auf der Außenhaut der Nebeltröpfchen eine Hülle und sanken langsam zur Grenzfläche des unteren Wasserkörpers (Abb. 7.11a, Schritt 3). Auch hier hatten sich Lipide in einer charakteristischen Orientierung angereichert und bildeten eine durchgehende Bedeckung der Grenzfläche wie einen Film auf dem Wasser. Beim Kontakt der sinkenden Wassertröpfchen mit der Grenzfläche umschloss sofort ein Teil des Lipidfilms die ankommenden Tröpfchen mit einer zweiten Hülle (Abb. 7.11a, Schritt 4). Fertig war das Vesikel, das in seinem Aufbau der Membranstruktur einer Zelle ähnelte. Es bestand innen aus destilliertem Wasser mit einem erhöhten Anteil organischer Verbindungen und außen aus einer Lipid-Doppelschicht – ein Aufbau, der als Grundlage einer Protozelle gelten kann. In Abb. 7.11b sind einige Vesikel, zum Teil mit Mehrfachhüllen, in mikroskopischen Dunkelfeldaufnahmen zu erkennen. Der eindeutige Nachweis des Vesikelaufbaus gelang mit Hilfe der Kernresonanzspektroskopie (KRS) [6]. Aus den ersten Messungen ergaben sich darüber hinaus Hinweise auf Konzentrationsgradienten, die in einer späteren Entwicklung der Vesikel als Energiequelle von Bedeutung sind: Die Wassertröpfchen sammeln während der Kondensation im  $\text{CO}_2$ -Gas eine Vielzahl organischer Moleküle ein. Nach dem Absinken in das Wasser ist die Konzentration dieser Moleküle im Tröpfchen gegenüber dem umgebenden Wasser um Größenordnungen höher. Auf der anderen Seite sind in den kondensierten Wassertröpfchen keine Salze gelöst. Übertragen auf das salzreichere Wirtswasser in hydrothermalen Störungszonen

bedeutet dies, dass durch den Vesikelbildungsprozess zwei entgegengesetzte Konzentrationsgradienten aufgebaut werden. Aus diesen Gefällen könnte eine erste Protozelle die Energie für einen einfachen Stoffwechsel geschöpft haben. Die Schritte 5 und 6 in Abb. 7.11a kennzeichnen den Abbau der Vesikel und den Neubeginn des Lebenszyklus. Ein Zyklus besteht aus dem Aufbau des Druckes bis zur Bildung von überkritischem  $\text{CO}_2$  und einer nachfolgenden Druckentlastung, sodass wieder Gas entsteht.

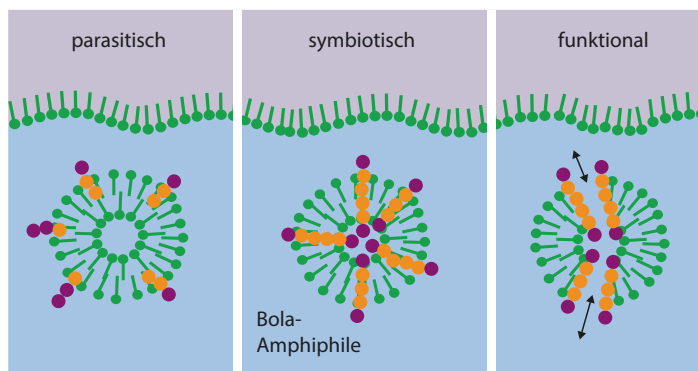
Christian Mayer ersann weitere Versuche, die wieder erstaunliche Ergebnisse zeigten. Zuerst ging es um die Frage, ob sich die Bedingungen in der Druckzelle dazu eignen, Aminosäuren zu Ketten zu verknüpfen – etwas, wozu man eigentlich Enzyme benötigt. Hierfür wurden 12 verschiedene Aminosäuren, von denen bekannt ist, dass sie in hydrothermalen Systemen gebildet werden können, in die Kammer gegeben. Das Ergebnis war wieder sehr überraschend. Innerhalb von Tagen bis Wochen vereinigten sich die Aminosäuren zu Peptiden mit Längen von bis zu 18 Einheiten. Das machte Mut. Von besonderem Interesse war nun die Frage, ob es eine mögliche Bevorzugung von bestimmten Peptiden in Wechselwirkung mit dem Aufbau der Vesikelmembran gibt. Ein erster längerfristiger Betrieb der Versuchsanordnungen ergab deutliche Hinweise, dass es eine wechselseitige Beeinflussung von Vesikeln mit Peptiden unter den eingestellten Bedingungen gibt, mit der Folge einer Auswahl bestimmter Aminosäureketten. Das wäre weltweit der erste gelungene Nachweis einer chemischen Evolution von Peptiden unter realistischen Verhältnissen. Inzwischen konnten größere Peptidmoleküle selektiert werden, denen wir bereits erste Funktionen zurechnen (Abb. 7.13) [7, 8].

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich bestimmte Abhängigkeiten der gebildeten Peptide zu den Vesikelhüllen erkennen. Es gibt wasserliebende (hydrophile) und

wasserfürchtende (hydrophobe) Aminosäuren. Aus ihnen lassen sich interessante Ketten kombinieren. Peptide, die nur aus hydrophilen Aminosäuren bestehen, werden sich nur im Wasser aufhalten und keinen Kontakt zu Vesikeln suchen. Hydrophobe Peptide werden von überkritischen  $\text{CO}_2$ -Tropfen ausgewaschen und in die  $\text{üCO}_2$ -Phase der Mikroautoklaven mitgenommen. Aber es gibt auch Ketten aus hydrophilen und hydrophoben Aminosäuren, die nicht eindeutig in das eine oder andere Medium übergehen. Sie werden als amphiphil bezeichnet. Für sie ist die Hülle der Vesikel interessant, die aus zwei Teilen besteht. Die äußere Hülle besteht aus langen Molekülen, die mit einem wasserliebenden Kopf nach außen gerichtet sind, während der lange Schwanzteil hydrophob ist und nach innen zeigt. Die innere Hülle ist mit den gleichen Molekülen genau umgekehrt aufgebaut. Der wasserliebende Kopf zeigt nach innen zum eingeschlossenen Wasser und der Schwanzteil nach außen bzw. in die Mitte der Hülle. Hierdurch ergibt sich ein Rückzugsraum für die Aminosäuren, die nichts mit Wasser zu tun haben wollen. Liegen Peptide vor, die auf der einen Seite hydrophile und auf der anderen Seite hydrophobe Aminosäuren eingebaut haben, können sie mit dem hydrophoben Anteil in der Hülle Platz nehmen, der Rest bleibt draußen. Es lassen sich jetzt viele Kombinationen durchspielen, von denen eine besonders interessant ist. Es gibt Peptide, die auf beiden Seiten einen hydrophilen Abschnitt und ein hydrophobes Mittelteil haben. Werden sie in das Vesikel eingebaut, bilden sie quasi Anker, die die Zelle stabilisieren. Bei günstigen Konstellationen entstehen kleine Kanäle, durch die Moleküle wandern können (Abb. 7.13). Hiermit vollzieht sich ein Konzentrationsausgleich der sogar für eine Energiegewinnung genutzt werden kann (Abb. 7.12).



**Abb. 7.12** Selektion von Peptiden: von heute in den Proteinen vorkommenden Aminosäuren werden 12 hydrothermal gebildet: Es sind 6 unpolare (orange) und 6 polare (blau). Die polaren halten sich bevorzugt im Wasser auf, die unpolaren werden in das überkritische  $\text{CO}_2$  ( $\text{ükcO}_2$ ) abgegeben. (Zeichnung: Christian Mayer)



**Abb. 7.13** Entwicklung von Peptiden in Verbindung mit einer Zellohülle [8]. Die parasitischen nutzen nur den Schutz der Hülle, die symbiotischen werden geschützt, stabilisieren aber gleichzeitig das Vesikel, und die funktionalen Peptide bilden einen Kanal, wodurch ein Konzentrationsausgleich möglich ist. Hierdurch wird ein Platzen des Vesikels verhindert. (Zeichnung: Christian Mayer)

## Literatur

1. Schreiber U, Locker-Grütjen O, Mayer C (2012) Hypothesis: Origin of life in deep-reaching tectonic faults. *Prebiotic Chem, Orig Life Evol Biosph* 42(1):47–54
2. Meschede M (2018) *Geologie Deutschlands*. Springer, Heidelberg
3. Fujioka K, Futamura Y, Shiohara T, Hoshino A, Kanaya F, Manome Y, Yamamoto K (2009) Amino acid synthesis in a supercritical carbon dioxide-water mixture. *Int J Mol Sci* 10:2722–2732
4. Wilde SA, Valley JW, Peck WH, Graham CM (2001) Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Ga ago. *Nature* 409:175–178
5. Schreiber U, Mayer C, Schmitz OJ, Rosendahl P, Bronja A, Greule M, Keppler F, Mulder I, Sattler T, Schöler HF (2017) Organic compounds in fluid inclusions of Archean quartz – analogues of prebiotic chemistry on early Earth. *PLOS ONE*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177570>.
6. Mayer C, Schreiber U, Dávila MJ (2015) Periodic vesicle formation in tectonic fault zones – an ideal environment for molecular evolution. *Orig Life Evol Biosph* 45(1–2): 139–148
7. Mayer C, Schreiber U, Dávila MJ (2017) Selection of prebiotic molecules in amphiphilic environments. *Life* 7(3) <https://doi.org/10.3390/life7010003>.
8. Mayer C, Schreiber U, Dávila MJ, Schmitz OJ, Bronja A, Meyer M, Klein J, Meckelmann SW (2018) Molecular evolution in a peptide-vesicle system. *Life* 8(16) <https://doi.org/10.3390/life8020016>.



# 8

## Ein hypothetischer Ansatz: Hydrothermale Systeme der frühen kontinentalen Kruste

### Inhaltsverzeichnis

8.1	Die Suche nach dem Weg. . . . .	167
8.2	Phase I – Bildung und Anreicherung . . . . .	173
8.3	Phase II – der Auswahlprozess . . . . .	180
8.4	Phase V (vorgezogen) – ein möglicher Start des Lebens . . . . .	187
8.5	Phase VI – LUCA wird sichtbar . . . . .	208
8.6	Phase III – Anleihen an die RNA-Welt. . . . .	216
8.7	Phase IV – der Lückenschluss. . . . .	224
8.8	Kann es so gewesen sein? . . . . .	233
	Literatur . . . . .	238

### 8.1 Die Suche nach dem Weg

Der Start war gelungen. Unsere ersten Experimente hatten gezeigt, dass wir uns auf einer heißen Spur bewegten. Das Verständnis für das Umfeld der möglichen

Lebensentstehung wurde immer besser. Die Experimente unter klar abgrenzbaren Rahmenbedingungen lieferten erste Hinweise auf realistische Szenarien und zusätzliche Berechnungen physikochemischer Abläufe von Christian Mayer boten eine sichere Basis für weitere Versuchsanordnungen. Die Präsentation der Ergebnisse auf zahlreichen internationalen Fachtagungen stieß inzwischen auf großes Interesse. Was fehlte war die Einbindung in eine Gesamtentwicklung, die letztlich in einer Informationsspeicherung und der Bildung der ersten Zelle münden sollte. Mit anderen Worten: Es fehlte ein Konzept, eine Vorstellung, wie es insgesamt gelaufen sein könnte. Gab es nicht einen Lösungspfad, der unter Berücksichtigung der eigenen und internationalen Ergebnisse zur Ursprungsforschung aufgezeigt werden konnte, für den es erst einmal keine Einschränkung in der Kombination gab, bei dem alles erlaubt war, sofern die grundlegenden physikalisch-chemischen Gesetzmäßigkeiten eingehalten wurden?

Um es noch einmal deutlich zu machen: In der Wissenschaft ist es problematisch, Hypothesen für Abläufe aufzustellen, deren Ursachen nicht durch Experimente in Gänze nachgewiesen werden können. Die Erforschung der Lebensentstehung ist aber ein besonderer Fall. Zu lange ist die Zeit der ersten Schritte vergangen und zu unbekannt sind bisher die Verhältnisse der frühen Erde, als dass sich die Verhältnisse mit einigen wenigen Versuchen rekonstruieren ließen. Versuche, die allerdings keinen hypothetischen Überbau besitzen, laufen unweigerlich in eine Sackgasse. Ihnen fehlt die Anbindung an das Ganze.

Wir waren an einem Punkt angekommen, an dem es sein musste. Wir brauchten eine oder mehrere Hypothesen, an denen wir die Möglichkeiten des Lebensbeginns in unterschiedlichsten Variationen durchspielen konnten. Die Formulierung einer auf dieses Forschungsfeld bezogenen Hypothese gleicht einem

Überführungsversuch eines Täters in einem gewagten Indizienprozess. Der Versuch kann leicht in die Irre führen. Bezogen auf die Prozesse der frühen Erde sind in Zusammenhang mit dem neuen Krustenmodell einige Indizien sichtbar geworden, die einen Rahmen mit ersten belastbaren Daten vorgeben. Es war daher konsequent, eine Hypothese durchzuspielen, die die Entwicklung von der einfachsten organischen Molekülbildung bis hin zu einer sich teilenden Zelle genau für dieses Umfeld beschreibt. Eine derartig umfangreiche Hypothese wirft zwangsläufig viele Fragen auf. Fragen sind die Voraussetzung für die Entwicklung gezielter Experimente, die Antworten auf der Suche nach einer Lösung geben können. Es wird sich in Zukunft zeigen, ob anhand der Versuche unterstützende Hinweise für das Modell gefunden werden können oder ob, im Gegenteil, bereits etablierte Annahmen verworfen werden müssen.

Etwas hatte mich von Beginn an in der Diskussion um die Entstehung des Lebens gestört. Es war ein Bauchgefühl, das umso stärker wurde, je weiter wir mit unseren Experimenten kamen. Wie konnten sich auf der einen Seite in unseren Experimenten relativ problemlos Peptide entwickeln, die mit mehr Zeit vielleicht bis zur Größe von Enzymen heranreifen, auf der anderen Seite aber keine Möglichkeit bestehen, die Information über ihren Aufbau zu speichern? Jedes Großmolekül hatte zu Beginn seine eigene Reihenfolge der Aminosäuren. Nach dem Zerfall war die Wahrscheinlichkeit der Bildung eines identischen Moleküls mit diesen gigantischen Variationsmöglichkeiten so gut wie gleich null. Es konnten sich nur ähnliche Moleküle bilden, die bestenfalls in Gruppen einzuteilen waren. Die Vertreter der RNA-Welt verfolgen einen anderen Ansatz und starten gleich mit einem RNA-Molekül. Sie können allerdings nicht erklären, wie zu Beginn die in den ersten RNA-Strängen gereihten Basengruppen zu



Informationseinheiten definiert werden konnten, damit eine exakte Zuordnung von Aminosäuren in den Enzymen möglich wurde. Dabei brauchten sich Enzyme und RNA von Anfang an – das berühmte Henne-Ei-Problem. Und im Hinterkopf schwangen bei jeder Überlegung gleich die unendlich großen Zahlen der Variationsmöglichkeiten mit. Wie konnte eine Lösung für all die Probleme und Fragen aussehen?

Es waren mehrere Wochenenden nötig, an denen ich Stapel von Zetteln mit Symbolen, Ketten und Flussdiagrammen vollzeichnete. Wir hatten einen Einstieg gefunden, irgendwie musste es eine Lösung für den Hauptteil geben, die wechselseitige Beziehung zwischen Enzymen und RNA. Ausgangspunkt in meinen Überlegungen war seit langem das Molekül, das die beiden Größen verband, die Transport-RNA. Es musste das Schlüsselmolekül sein. Es trug eine genau zugehörige Aminosäure zu dem Ort des Zusammenbaus und die Information darüber stand wie der Barcode an einem Paket auf der anderen Seite. Es ist einfach, sich vorzustellen, dass man heute verschiedene beladene tRNAs nebeneinanderlegen könnte, auf der einen Seite die Aminosäuren verbinden und auf der anderen die jeweils drei Basen (Anticodon) als Template, als Vorlage für eine sich anlagernde RNA benutzen. Das Ergebnis wäre die Speicherung eines Peptids in einer RNA. Das funktioniert heute nur deshalb, weil die Aminosäure an einer Synthetase nur mit einer zugehörigen tRNA verbunden wird und dadurch die Zuordnung des Anticodons eindeutig ist. Zu Beginn gab es keinerlei spezifische Zuordnungen. Der Weg, das Problem zu lösen, schien darin zu liegen, eine wachsende Abhängigkeit zwischen den Molekülen zu erkennen, die schließlich zu einer entsprechenden Zuordnung geführt haben konnte. Von Anfang an muss bei der Bildung der Peptide eine Verbindung zum

Speicherungsverfahren bestanden haben. Ich war überzeugt, dass die Kopplung der beiden Molekülgruppen, der RNA und der Peptide, miteinander, ein iteratives Verfahren sein musste, Schritt für Schritt: Bekommst du eins von mir, bekomme ich eins von dir. Und dass mit nur ganz wenigen Spezies, sodass die Kombinationsmöglichkeiten nicht aus dem Ruder laufen konnten.

Das Ergebnis der Überlegungen führt zu einem hypothetischen Modell, das in Teilen überprüfbar ist. Die zukünftigen Experimente werden zeigen, welcher Ansatz am vielversprechendsten ist. Hiervon ausgehend werde ich in der nachfolgenden Darstellung versuchen, einen neuen Blick auf das Problem der Informationsspeicherung zu richten. Sie stellt die Basis für die gesamte Lebensentwicklung dar. Hierbei ist es hilfreich, sich dem entscheidenden Punkt der ersten Zellvermehrung von zwei Seiten zu nähern. Die eine ist die vorwärtsgewandte, die vor dem Beginn des Lebens startet, mit der Molekülbildung bis zur ersten erfolgreichen Zellteilung. Die andere ist die rückwärtsgewandte, die aus heutiger biochemischer Sicht in die Vergangenheit blickt.

Der Prozess, der die letzten Milliarden Jahre dafür gesorgt hat, dass sich lebende Zellen vermehrten und nicht abstarben, muss einen Anfang gehabt haben. Ein Anfang, der mit einer minimalen Ausstattung die wesentlichen Grundlagen für eine Informationsspeicherung über die bis dahin erfolgreich konstruierten Bauteile bereitgestellt hat. Es gibt viele gute Gründe, diesen Anfang in ein offenes System der Erdkruste, in Spalten mit einer beständigen Molekülzufuhr und einer Entsorgung des überflüssigen Materials zu verlegen. Um es vorwegzunehmen: Erst unter solchen Rahmenbedingungen können aus meiner Sicht Stoffwechsel, Zellen, die Ausstattung einer Zelle und schließlich die Vermehrung des Gesamtsystems entwickelt werden.

Wie kam es aber zur Ausbildung der ersten spezifischen Synthetasen, die letztlich die gesicherte Zuordnung der Bausteine garantieren, die im Ribosom für die Bildung der Enzyme und die Synthetasen wieder selbst gebraucht werden? Heute steckt der Code für ihre Sequenz in der DNA, der nach Übertrag auf eine mRNA von Letzterer abgelesen werden kann. Eine zufällig gebildete RNA hat, wie oben beschrieben, für die Bildung von Aminosäureketten keinen Informationswert. Den bekommt sie erst, wenn sich ihr spezifisch und codiert Aminosäuren zuordnen lassen, die für den Bau eines funktionsfähigen Peptids erforderlich sind. Die große Anzahl der Aminosäuren in Peptiden, die enzymatische Funktionen übernehmen können, verhindert jegliche zufällige Kombination, die im Zusammenspiel mit der RNA auftreten könnte. Dafür sind die Variationsmöglichkeiten so gigantisch groß, dass die Lebenszeit des Universums nicht ausreichen würde, um ein brauchbares Ergebnis zu erhalten. Es ist an dieser Stelle meine unumstößliche Überzeugung, dass es grundsätzlich eine gemeinsame Entwicklung gegeben haben muss, die ein gegenseitiges Aufbauen der „Software“ (RNA) und der „Hardware“ (Enzyme) ermöglichte.

Um diese Überzeugung nachvollziehbar zu machen, werde ich in den folgenden Kapiteln auf die wichtigsten Schritte in der Entwicklung des Lebens eingehen, wie sie sich aus den bisherigen Überlegungen darstellen. Sie bauen aufeinander auf und fanden teilweise parallel nebeneinander statt. Hierzu gehören die Sortierung der Moleküle (I), ihr Auswahlprozess (II), die Bildung einer RNA-Teilwelt (III), die Verknüpfung der Proteinwelt mit der RNA-Teilwelt (IV), der Start der Informationsspeicherung (V) sowie der Prozess der ersten Zellteilung (VI). Als Geologe lernt man bereits in den ersten Semestern, die Erdgeschichte zu gliedern und in Zeitscheiben

immer weiter aufzuteilen. Warum nicht auch den Start, mit dem alles begann?

Ich bitte zu akzeptieren, dass aus sprachlichen Gründen die Formulierungen häufig so gewählt sind, als ob es sich um einen Bericht über bereits bekannte Prozesse handelt. Es ist und bleibt nach wie vor eine Hypothese, sodass ich alles im Konjunktiv hätte schreiben müssen. Das allerdings wollte ich vermeiden.

## 8.2 Phase I – Bildung und Anreicherung

Eine der wesentlichen Voraussetzungen für die Bildung größerer Moleküle ist die Konzentration und Auslese von Ausgangsstoffen verschiedenster organischer und anorganischer Moleküle. Ein 100 kg schwerer Mensch besteht aus ca.  $10^{28}$  Atomen. Das ist eine Eins mit 28 Nullen. Die Anzahl der Moleküle, zusammengesetzt aus den Atomen, ist um drei bis vier Größenordnungen kleiner. Das heißt, wir bestehen im Mittel aus vielleicht  $10^{24}$  Molekülen. Ohne Bedenken lässt sich voraussetzen, dass in der Erdkruste über mehr als 20 km in der Vertikalen ein Vielfaches an organischen Molekülen gebildet werden kann – Molekülen, die aufsteigen, miteinander in Kontakt kommen und zu neuen Verbindungen reagieren. Allein die Zahlendimensionen machen deutlich, welche unendliche Vielfalt neuer chemischer Bausteine bei diesen Vorgängen gebildet werden können. Um aus dem großen Vorratstopf der Molekülsuppe etwas für die Bildung biologisch relevanter Moleküle gewinnen zu können, sind ständig Anreicherungen und Sortierungsprozesse notwendig. In allen natürlichen Umgebungen, in denen Materialtransport stattfindet, haben wir entsprechende

Vorgänge. Als Beispiel kann der Transport von Sediment in einem Fluss aus dem Gebirge zum Flachland und schließlich zum Meer dienen. Allein durch Transport im fließenden Wasser erfolgen Trennungen des Gesteinsmaterials nach Größe und Dichte. Die dicksten Brocken bleiben noch im Gebirge und müssen vor dem Weitertransport erst in kleinere Stücke zerfallen. Die Kiese und Sande werden sofort abgesetzt, wenn sie ins Flachland mit nachlassender Fließgeschwindigkeit des Gewässers kommen. Die Tone bleiben größtenteils in Schwebelage und werden bis ins Meer transportiert. An bestimmten Stellen reichern sich schwere Minerale wie Magnetit, Erz oder Gold an, obwohl es nur kleine Körner sind. Was hat dies mit einer Störungszone in der Kruste zu tun? Es geht um grundsätzliche Trennungsprozesse, die durch strömendes Wasser entstehen.

In einer tiefreichenden offenen Bruchzone entstehen Fließbewegungen durch aufsteigende Gase und Wässer in Richtung der Oberfläche oder, bei Einsickern von Wässern in höher gelegenen Gebirgsregionen, in entgegengesetzte Richtung. Die hoch liegenden Eintrittspunkte des Wassers führen zu einem artesischen Austritt in tiefer liegenden Gebieten, sobald sich kommunizierende Wegsamkeiten durch kreuzende Störungsbahnen auftun. Auch in diesem fließenden Milieu werden Trennungen nach Masse vollzogen, die aber durch Oberflächenladungen der Minerale an den Wänden überlagert werden. Die Moleküle, die an den Gesteinswänden mit den Fluiden vorbeiwandern, können festgehalten werden, vielschichtige Lagen aufbauen und weitere Stoffe binden oder nach Reaktion passieren lassen. Das Bild einer Luftblase im Aquarium, die unter einem schräg ansteigenden Blatt langsam nach oben kullert, verdeutlicht einen der vielen Vorgänge in der Tiefe. Die Bruchzonen haben vielfach schräg stehende Begrenzungsflächen, an denen kleine

Tröpfchen von überkritischem Gas (Kohlenstoffdioxid und Stickstoff) nach oben rollen. Die geringere Dichte als Wasser dieser Tröpfchen macht es möglich. Molekülfilme, die an den Mineralen der Wandungen unterschiedlich fest haften, kommen so direkt in Kontakt mit der Grenzfläche der überkritischen Gasbläschen. Hierbei können Stoffe aufgenommen werden, wenn sie mehr ein organisches Lösungsmittel lieben (hydrophobe Moleküle). Sind es hydrophile Moleküle, die selbst lieber im Wasser verbleiben, besteht die Möglichkeit, dass sie direkt an der Oberfläche des Tröpfchens mit den eingesammelten hydrophoben Molekülen reagieren und mitgenommen werden. So sammeln die Tröpfchen fast wie beim Schneemannbauen vieles mit ein, was später für komplexere Molekülbildungen gebraucht werden kann.

Ein nächster Schritt ist die Trennung bzw. Auswahl von Molekülen über immer wiederkehrende Prozesse, bei denen über große Zeiträume (Zehn- oder Hunderttausende Jahre und länger) beständig gleiche Abläufe zu immer ähnlichen Molekülgruppen führen. Der beschriebene Vorgang im Übergangsbereich von überkritischem  $\text{CO}_2$  zu  $\text{CO}_2$ -Gas ( $\text{ükcO}_2$  zu  $\text{gCO}_2$ ) in ca. 1000 m Tiefe der Kruste ist ein sehr effektiver Prozess, um Vesikel entstehen zu lassen (s. Abschn. 7.3). Die Bausteine der Vesikel (u. a. Phospholipide) stammen aus der Verkettung von Kohlenstoffmonoxid mit Wasserstoff (ähnlich der Fischer-Tropsch-Synthese) und im Fall des Phosphats aus dem Mineral Apatit. Es ist ein häufiges Mineral vieler Gesteine, das durch saure Wässer der Störungszonen leicht aufgelöst wird. Ein zermahlener Apatit war in unserer Hochdruckanlage unter Versuchsbedingungen der oberen Kruste (1000 m Tiefe) nach wenigen Tagen vollständig aufgelöst. Aminosäuren, die in unterschiedlichen Tiefen gebildet werden (u. a. aus  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CO}$ ), können sich durch die Prozesse in der 1000-m-Grenzzone

zu Peptiden verbinden und in Kontakt mit den Vesikeln gelangen. Die Vesikel bieten über ihre Zusammensetzung und die Struktur ihrer Hülle die Möglichkeit, bestimmte Aminosäureketten herauszufiltern. Druckschwankungen durch Erdgezeiten zwei Mal am Tag oder noch häufiger durch  $\text{CO}_2$ -gesteuerte Geysirausbrüche führen zu rhythmischen Veränderungen, die kontinuierlich den Aufbau und Zerfall von Vesikeln und Molekülen steuern. Ein besonders hervorzuhebender Aspekt der Übergangszone in 1000 m Tiefe ist die Erzeugung einer großen Menge Entropie, sowohl beim Übergang vom überkritischen  $\text{CO}_2$  zum Gas (Ausdehnung, geringere Ordnung) als auch umgekehrt (Gaskompression, Erwärmung, Wärmeabgabe). Es bedeutet, dass eine Reaktion der Moleküle stattfinden kann, obwohl dadurch Ordnung entsteht und Entropie erniedrigt wird, weil die parallel erzeugte große Menge an Entropie des gesamten Systems und die gekoppelten Temperaturpfade die minimale Erniedrigung mehr als kompensieren. Gleichzeitig wird durch das Herausdrücken der Wassersäule bei einem Geysirausbruch Arbeit verrichtet. Ein kleiner Teil hiervon treibt turbulente Zirkulationen in den Kavitäten an. Ebenso führen bestimmte chemische Reaktionen in den Mikroautoklaven zur Speicherung von Energie. Reaktionen, die im Umfeld des Phasenüberganges  $\text{ükcO}_2/\text{gCO}_2$  erfolgen, haben in Bezug auf Entropieerhöhung und Energieumsetzung hierdurch ideale Voraussetzungen. Hinzu kommen Änderungen des pH-Wertes, der durch die Druckschwankungen variiert. In der überkritischen Phase liegt er aufgrund des hohen  $\text{CO}_2$ -Anteils etwa bei pH 3,3. Sobald der Druck nachlässt und sich Gas bildet, steigt der pH-Wert um ca. zwei Einheiten. Gleichzeitig nimmt durch die Ausdehnung des Gases die Temperatur um bis zu 20 °C ab. Nach der Eruption baut rücklaufendes Wasser schnell wieder den ursprünglichen Druck auf. Hierdurch wird

das vorhandene Gas bis zur überkritischen Phase komprimiert. Der Vorgang ist mit einem Temperaturanstieg verbunden, der mit weit über 60 °C die Schmelztemperatur einer Doppelstrang-RNA erreicht (s. u.). Diese besonderen Bedingungen in ca. 1000 m Krustentiefe lassen Reaktionen zu, die auf der Oberfläche der frühen Erde kaum möglich waren. Bohrkern aus tiefen Bohrungen, die in 1000 m Tiefe in Mofetten (CO<sub>2</sub>-Quellen) gewonnen werden, können vielleicht diese Prozesse heute noch nachweisen.

Das Molekülangebot bei diesem Prozess war und ist auch heute noch gigantisch. In den biologischen Zellen kommen überwiegend 20 Aminosäuren zum Einsatz. Man kennt inzwischen aber über 400 verschiedene Spezies, von denen die meisten in der Natur keine Rolle spielen. Untersuchungen zum zeitlichen Auftreten der Aminosäurespezies in den Zellen ergaben, dass es eine ältere Gruppe von ca. zehn bis zwölf verschiedenen gibt, die hydrothermal gebildet werden können [1, 2]. Bis auf Glycin, die einfachste Aminosäure, besitzen alle mindestens zwei voneinander abweichende Strukturen (D und L), bei denen die chemische Zusammensetzung identisch ist. Sie sind chiral und besitzen entweder eine links- oder rechts-händige Konfiguration. Welche Ausleseprozesse haben letztendlich dazu geführt, dass nur die kanonischen (die in der Natur für den Aufbau der Proteine verwendeten) Aminosäuren und diese bis auf wenige Ausnahmen ausschließlich mit der L-Händigkeit in der Evolution Verwendung fanden?

Aber halt! Es gibt auch einen bestimmten Anteil an D-Aminosäuren in den Zellen, der je nach Art der Zelle unterschiedlich hoch sein kann. Wesentlich hierfür sind zwei verschiedene Ursachen. Die erste ist physikochemisch begründet. Es ist immer das Bestreben einer Molekülgruppe, einen energetisch günstigen Zustand einzunehmen.



Er ist bei einer Aminosäurespezies dann erreicht, wenn das Verhältnis zwischen der D- und der L-Version 1:1 ist. Das bedeutet, eine Ausgangsmenge von 100 % L-Aminosäure wandelt sich in einer charakteristischen Zeit (die je nach Spezies sehr unterschiedlich sein kann) in eine Menge von 50 % D- und 50 % L-Aminosäure um – ein Effekt, der zur Altersbestimmung von organischen Substanzen z. B. in der Forensik genutzt wird.

Die zweite Ursache liegt in einer alternativen Bildungsmöglichkeit bestimmter Peptide, bei der es zum Einbau von untypischen Aminosäuren wie zum Beispiel der D-Aminosäuren kommt. Sie werden nicht über den üblichen Prozess an einem Ribosom verknüpft, das die genaue Zuordnung der aminosäurebeladenen tRNA kontrolliert und nur die L-Variante zulässt. Die Bildung erfolgt in großen Enzymkomplexen, ohne dass eine RNA daran beteiligt ist (nichtribosomales Peptid) [3]. Vorstellen kann man sich diesen Komplex wie ein dreidimensionales Puzzle aus verschiedenen Enzymen, die jedes für sich über den üblichen Weg am Ribosom gebildet wurden. In diesem Konstrukt wird völlig unabhängig von einem Ribosom und einer Vorlage aus einer RNA eine ganz andere Art von Peptid katalysiert, dessen Aufbau nicht in der DNA abgespeichert ist. Sein Bauplan ergibt sich indirekt quasi über Bande, nur durch die festgelegte Anordnung der Enzyme in diesem Komplex, die über genau abgestimmte, aufeinander folgende Schritte den Zusammenbau steuern. Diese Art der Peptidbildung erfolgt in einigen Arten von Bakterien, Archaeen und Pilzen, aber auch in verschiedenen im Meer lebenden Schnecken.

Was nützt uns diese Information für unsere Betrachtung der Molekülsortierung? Sie zeigt, dass es kein biologisches Gesetz gibt, das die Verwendung von D-Aminosäuren in den Zellen verbietet. Ihre Existenz in manchen Peptiden gibt möglicherweise einen Hinweis

auf die Ursachen für die ausschließliche Festlegung der L-Aminosäuren in den Proteinen und Enzymen im Laufe der chemischen Evolution (Chiralitätsproblem). Der Einbau der D-Spezies geschieht in den puzzleartigen Enzymkomplexen ohne Beteiligung einer RNA, lediglich durch festgelegte Reaktionsschritte, die ausschließlich durch die beteiligten Enzyme katalysiert werden. Dies bedeutet, dass seitens der Enzyme, obwohl sie alle aus L-Aminosäuren aufgebaut sind, keine zwangsläufige Festlegung für die eine oder andere Orientierung der Aminosäuren in dem neu zu bildenden Peptid vorgegeben wird. Ganz anders sieht es bei der Peptidbildung an einem Ribosom aus. Hier hat heute die Verknüpfung einer D-Spezies keine Chance. Neben Aminosäuren lassen sich auch Zucker und organische Basen als Produkte der hydrothermalen Umgebung ableiten. Sie sind genau wie die Aminosäuren mit zahlreichen Spezies vertreten, von denen wieder nur die heute in der RNA und DNA vorkommenden herausselektiert wurden. So wird die Ribose, der Zucker in der RNA, nur in seiner rechtshändigen Form (D) verwendet, genau wie sein Verwandter, die Desoxyribose in der DNA. Daneben gibt es aber auch verschiedene Zucker der L-Variante, die in den Prozessen der biologischen Zellen verwendet werden.

Zusammenfassend lässt sich für eine fluidführende Störungszone in der Kruste festhalten:

- Organische Moleküle können in der kontinentalen Kruste in der Vertikalen über weite Strecken gebildet werden. Bei chiralen Molekülen entstehen immer gleich viele L- wie D-Spezies.
- Durch Auflösung von Gesteinsmineralen werden Phosphat, Metalle, Bor und andere Stoffe freigesetzt.
- Ein Sammelvorgang durch aufsteigende überkritische Gase führt zu einer starken Anreicherung in Kavitäten

(Mikroautoklaven) und in der Übergangszone zum unterkritischen Gas in ca. 1000 m.

- Es bestehen optimale Bedingungen hinsichtlich der Energie und Entropie, sodass eine Verknüpfung der Moleküle zu Ketten begünstigt wird. Dies ist in Laborversuchen bereits bestätigt.

## 8.3 Phase II – der Auswahlprozess

Bei der Vorstellung davon, wie umfangreich das Angebot an Molekülen gewesen ist, stellt sich sofort die Frage, welche physikochemischen Gesetzmäßigkeiten letztendlich die Auswahlprozesse zum Start des Lebens gesteuert haben müssen.

Als ein Ausgangspunkt kann das Vesikelmodell (Abschn. 7.3) dienen, mit dem wir bereits Laborerfahrungen für eine Molekültrennung gemacht haben. Die in der Grenzzone  $\text{ukCO}_2/\text{gCO}_2$  entstehenden Vesikel sind nicht alle gleich. In Abhängigkeit von den Ausgangsstoffen bilden sich unterschiedlichste Lipide, die jeweils andere Strukturen in den Hüllen ausbilden. Unterschiedliche Vesikelhüllen wechselwirken mit Peptiden aus dem Umfeld auch unterschiedlich, wodurch eine erste Molekültrennung allein aufgrund der Hüllstrukturen stattfindet. Aber alle Vesikel wirken auf eine Trennung in hydrophobe und hydrophile Aminosäuren hin. Die Trennung geschieht in den Kavitäten durch das Nebeneinander von Wasser und überkritischem  $\text{CO}_2$ , das als Lösungsmittel für hydrophobe Moleküle dient. Eine Verkettung von hydrophoben und hydrophilen Spezies an der Grenzfläche ergibt Peptide mit Aminosäuren, die beide Eigenschaften besitzen. Je nachdem, welcher Kettenteil überwiegt, können die Peptide insgesamt hydrophob oder hydrophil ausfallen. Fällt das organische Lösungsmittel

weg, weil es plötzlich gasförmig wird, können sich die hydrophoben Anteile der Aminosäurekette in den Zellwänden der Vesikel „verstecken“, während die anderen Anteile heraus schauen. Werden die Vesikel durch Turbulenzen bei Druckverlust nachfolgend zerstört, gelangen die Peptide zwangsweise ins Wasser.

Jetzt geschieht Folgendes: Die langen Ketten versuchen die hydrophoben Anteile in ihrem Verband erneut vom Wasser fernzuhalten. Das schaffen sie, indem sie sich strukturieren, zu komplexen Gebilden falten und die hydrophoben Anteile so weit wie möglich mit den hydrophilen umgeben. Es entsteht also eine Art Knäuel mit einem wasserscheuen Zentrum und einer Hülle, die Wasser liebt. An dieser Stelle könnte das gleiche Angebot an Molekülen mit der L- und der D-Konfiguration dazu führen, dass auch die Ketten aus Aminosäuren eine komplexe Mischung aus beiden Formen besitzen. In der Evolution hat sich ab einem bestimmten Zeitpunkt bei den Aminosäuren nur die L-Form durchgesetzt. Wichtig ist es daher, einen Prozess zu identifizieren, der zu einer Trennung der beiden Orientierungen geführt hat. Erst als es Peptide gab, die nur aus einer Spezies bestanden (enantiomerenreine Peptide), konnte der Wettlauf zwischen den beiden Versionen beginnen. Es ist daher nicht sinnvoll, auf zufällige Verknüpfungen zu bauen, die zu einem enantiomerenreinen Peptid geführt haben können. Mit diesem Ansatz kommen für ihre Bildung sehr schnell unendlich kleine Wahrscheinlichkeiten ins Spiel, die durch die hohe Anzahl der Aminosäuren und Variationsmöglichkeiten bedingt sind (s. o.).

Nein, es muss eine Trennung gegeben haben, die von den Verhältnissen der Umgebung vorgegeben wurde. Und damit schauen wir uns wieder die Situation in den Störungszonen an. Untersuchungen zu Peptidbildungen haben gezeigt, dass bei einem Aminosäuregemisch mit

jeweils beiden Händigkeiten zu gleichen Teilen (racemisch) im neutralen Umfeld bei pH 7 Ketten gebildet werden, die beide Varianten einbauen. Sie sind nicht enantiomerenrein. Liegen allerdings saure Bedingungen mit niedrigen pH-Werten wie in den hydrothermalen Spalten vor, bilden sich Peptide mit überwiegend nur einer Händigkeit [4]. Dieser wichtige Befund kann nicht genug betont werden, da hiermit eine bedeutende Voraussetzung für die Molekültrennung gegeben ist. Sie stellt eine der wesentlichen Grundlagen für die weitere Entwicklung dar, was sofort deutlich wird, wenn wir die weiteren Schritte anschauen. Aus den Ketten bilden sich ab einer bestimmten Länge schnell dreidimensionale Strukturen. Sie sind deutlich stabiler als ungefaltete Peptide und haben folglich eine längere Lebensdauer.

Aber welche Größenordnung ist gemeint, wenn es um die Lebensdauer von Peptiden geht? Eine einfache Frage, eine vielschichtige Antwort: Es hängt wieder von den Verhältnissen ab. Unter hohem Druck und hoher Temperatur in der Erdkruste müssen wir bei niedrigen pH-Werten eine Lebensdauer von Stunden, vielleicht Tagen ansetzen. Bei Temperaturen unter 40 °C und neutralen Bedingungen steigt die Lebensdauer auf mehrere Hundert bis über Tausend Jahre an, abhängig von der Art der Aminosäuren.

Wir haben somit für die Frühzeit der Erde einen Prozess identifiziert, der zu einer effektiven Trennung von rechts- und linksorientierten Aminosäuren führte, sobald sich Peptide in einem sauren Milieu bildeten. In dieser Phase war allerdings noch nicht entschieden, welche der beiden Händigkeiten sich später durchsetzen würde. Auch die Wahl der kanonischen, heute verwendeten Aminosäurespezies erfolgte erst später.

Die bisherige Beschreibung einer Aminosäureauswahl zielte auf Unterschiede, die durch die Eigenschaften hydrophob und hydrophil der betreffenden Spezies gegeben sind. Das Peptidknäuel mit dem wasserscheuen Zentrum

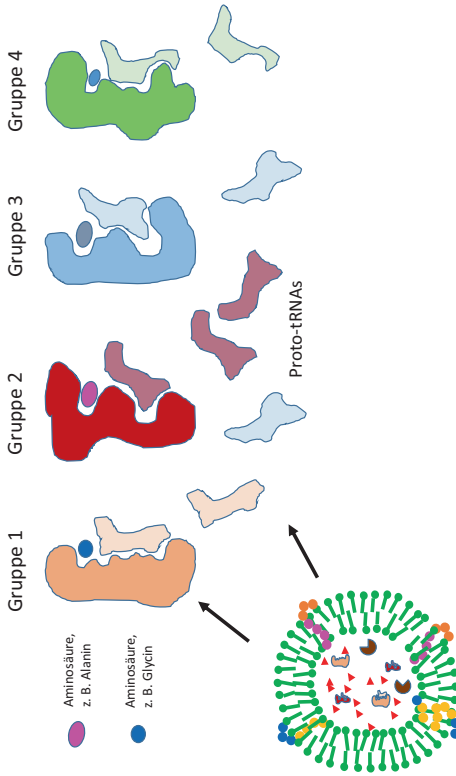
kann durch die niedrigen pH-Werte in der hydrothermalen Störungszone entweder nur aus Aminosäuren der L- oder der D-Form bestanden haben. Unabhängig von der Konfiguration lassen sich die Aminosäuren weiterhin dadurch unterscheiden, ob sie bevorzugt  $H^+$ -Ionen aufnehmen oder lieber abgeben, das heißt, ob sie sauer, basisch oder neutral reagieren. Auch diese Eigenschaften müssen für weitere Ausleseprozesse in Betracht gezogen werden. Denn je nachdem, welcher Aminosäuretyp in einem Peptid dominiert, gibt es Unterschiede in den Eigenschaften des gesamten Peptids. Das kommt unter anderem dann zum Tragen, wenn sich die pH-Werte und damit das Angebot an  $H^+$ -Ionen während der Phasenübergänge in 1000 m Tiefe verändern. Durch die Druckentlastung während eines Geysirausbruchs treten Schwankungen im pH-Wert um bis zu zwei Einheiten auf. Insgesamt führt der an die Vesikel angekoppelte Ausleseprozess über lange Zeiträume zu längeren enantiomerenreinen Peptiden, die sich zu komplexen Strukturen falten können. Je nach Art der Struktur besteht die Möglichkeit, dass die Peptide katalytisch wirksam werden. Damit entsteht relativ unkompliziert ein molekulares Werkzeug, das enzymatische Funktionen besitzt.

Wir müssen an dieser Stelle akzeptieren, dass die Entwicklung bis hierher zwar komplexe Moleküle hervorgebracht haben konnte, aber die enzymartigen Gebilde nichts anderes als Eintagsfliegen waren. Wenn sie hydrolysierten, das heißt in ihre Bestandteile zerlegt wurden, rückte kein identisches Molekül nach. Jedes auf diese Art gebildete Peptid war ein Zufallsprodukt, das nach seinem Zerfall nicht in gleicher Form nachproduziert werden konnte. Es fehlten die Speicherung des Bauplans und der Mechanismus, der einen exakten Nachbau ermöglichte. Trotzdem können wir etwas aus diesem Prozess gewinnen. Aus der Wechselwirkung Vesikel/Peptid lässt sich ein Grundmuster erkennen, das durch den jeweiligen Aufbau

der Vesikelhülle immer zu ähnlich strukturierten Peptiden führt, eine Art Auslese, die im weiteren Verlauf von Bedeutung ist.

Es zeigt sich, dass durch die rhythmische Vesikelbildung im sauren Milieu strukturierte Peptide mit Aminosäuren gleicher Händigkeit gebildet werden konnten, und das in großer Anzahl. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass es vermutlich ein starkes Ungleichgewicht im Angebot der einzelnen Aminosäuren gegeben hat. Die am häufigsten vertretenen Spezies mussten zwangsläufig diejenigen gewesen sein, die am einfachsten gebaut sind und somit die günstigsten Bildungsvoraussetzungen hatten. Es sind Glycin und Alanin. Unter Berücksichtigung der großen Zahlen in den Kombinationsmöglichkeiten ist es wieder ein glücklicher Umstand, dass Glycin achiral ist. Unter sauren Bedingungen lassen sich damit leicht enantiomerenreine Peptide in Kombination mit Alanin erhalten, die entweder eine L- oder eine D-Konfiguration besitzen. Voraussetzung ist ein deutliches Überangebot dieser beiden einfachsten Aminosäuren. Die anderen 8 bis 10 hydrothermalen Aminosäuren traten entsprechend ihrer Komplexität mit abnehmender Konzentration auf. Die andere Hälfte der 20 kanonischen Aminosäuren hat vermutlich erst in einem späteren Stadium, wahrscheinlich in Verbindung mit bereits höher entwickelten Enzymen, an der weiteren Entwicklung der Zellen teilgenommen.

Aus der Vielzahl der gefalteten Peptide lassen sich aus heutiger Sicht Gruppen (immer noch als L- und D-Formen) abtrennen, die unterschiedliche Strukturen oder Häufungen bestimmter Aminosäurespezies gehabt haben (Abb. 8.1). Sie verhielten sich zusätzlich in der Summe eher neutral, basisch oder sauer. Die Gruppeneinteilung wurde im Verlauf der Entwicklung auf der einen Seite von der Struktur und Zusammensetzung der Vesikelhülle vorgegeben, auf der anderen durch Bildungsprozesse,



**Abb. 8.1** Bildung von Gruppen ähnlicher Enzyme, zum Teil in Wechselwirkung mit Lipiden der Vesikelhülle (Gruppe 1 und 2). Die Sequenz der Aminosäuren ist nicht gespeichert, in ihr steckt nur eine relativ unspezifische Information, zum Teil ausgehend von den verschiedenen Lipidhüllen der Vesikel. Daneben gibt es weitere Enzyme, die frei gebildet sind, ohne Wechselwirkung zu Vesikeln (Gruppe 3 und 4). Die Enzyme gehen sowohl mit Proto-tRNAs als auch mit bestimmten Aminosäuren schwache spezifische Bindungen ein. Sie katalysieren die Verknüpfung der vorhandenen Aminosäuren mit der tRNA (bevorzugte Paarungen mit den am häufigsten vertretenen Aminosäuren Glycin und Alanin). Die schwach spezifischen Kontakte resultieren nicht aus der Sequenz der Aminosäuren in den Enzymen, sondern aus der Affinität zum Gruppentyp



die nicht in Wechselwirkung mit den Vesikeln standen. Dadurch, dass immer ähnliche Vesikel gebildet wurden und die anderen Rahmenbedingungen ähnlich blieben, gab es auch immer wieder ähnlich ausgebildete Mitglieder der Gruppen. Auch heute noch lassen sich bestimmte Funktionsmoleküle in mindestens zwei morphologisch verschieden ausgebildete Varianten unterscheiden. Hierzu gehören die tRNA-Synthetasen, bei denen es zum Beispiel Unterschiede in der Größe der Erkennungsstrukturen für die Anlagerung der tRNA gibt [5, 6]. Dieser Punkt wird noch ein wichtiges Argument in der Diskussion um die Informationsspeicherung in der RNA sein.

Die tRNA trägt zu diesem Zeitpunkt keine spezifische Information. Das ständige Kopieren führt durch Mutationen zu vielen Variationen. Hiervon betroffen sind überwiegend einsträngige Abschnitte wie der des Anticodons oder andere Schleifen des Moleküls. Die verschiedenen Varianten besitzen unterschiedliche Prioritäten, mit den Enzymen in Kontakt zu treten. Nicht jede tRNA geht mit jedem Gruppentyp eine Verbindung ein. Es ist letztendlich die Kopplung zweier Systeme, die nur sehr schwach spezifische Informationen besitzen. Hieraus müssen sich mit den nächsten Entwicklungsschritten eine spezifische Zuordnung und die Speicherung der Information in einer RNA entwickeln.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Vesikel und Peptide entstehen in der Kruste in einer Tiefe von ca. 1000 m.
- Bestimmte Peptide wechselwirken mit den Vesikeln; es reichern sich die Peptide an, die durch die Hülle geschützt werden.
- Unterschiedliche Vesikelmembranen führen zu unterschiedlich strukturierten Peptiden, die in der Reihenfolge der Aminosäuren sehr variabel sind, sich aber zu

Gruppen zuordnen lassen. Hinzu kommen Peptidgruppen, die nicht mit Vesikeln in Wechselwirkung treten.

- Es bilden sich normalerweise Mischpeptide mit L- und D-Aminosäuren. Allerdings gibt es Unterschiede, die vom pH-Wert abhängen. Während die gemischten Peptide mit beiden Orientierungen im neutralen Bereich bei pH 7 gebildet werden, können bei niedrigen pH-Werten enantiomerenreine aus nur einer Spezies auftreten.
- Bilden sich in diesem Umfeld längere Ketten, entwickeln sich schnell dreidimensionale Strukturen, die stabiler sind und länger überleben als ungefaltete Peptide.
- Das hydrothermale Umfeld führt zur bevorzugten Bildung der einfachsten Aminosäuren Glycin und Alanin. Glycin ist achiral und Alanin chiral. Aus dieser Kombination lassen sich unter sauren Bedingungen leicht enantiomerenreine Peptide aus nur zwei Aminosäuren bilden.
- Aus der ribosomalen RNA hat sich eine tRNA entwickelt, die durch Mutationen zahlreiche Variationen ausbildet. Die unterschiedlichen Bildungen haben unterschiedliche Bevorzugungen im Kontakt mit den Enzymen der verschiedenen Gruppen.

## 8.4 Phase V (vorgezogen) – ein möglicher Start des Lebens

Die Ausführungen der beiden vorangegangenen Kapitel werden durch experimentelle Nachweise über die Reaktionen von Peptiden an Vesikelmembranen unter Bedingungen der tieferen Kruste gestützt. Sie sind Teil der Forschungsergebnisse unserer Essener Arbeitsgruppe

(s. Abschn. 7.3). Für die Einteilung von Gruppen heutiger Synthetasen und zugehöriger Aminosäuren gibt es ältere Arbeiten, z. B. Eriani et al. [5]. In den folgenden Kapiteln nutze ich die bisher vorliegenden Erkenntnisse und Ergebnisse als Basis, um ein rein hypothetisches Szenario für die weitere Entwicklung zu entwerfen. Es soll einen möglichen Weg von vielleicht vielen aufzeigen, wie unter realistischen Bedingungen komplexe Reaktionen und Abläufe zur Bildung von LUCA geführt haben können. Das Szenario wird zusätzlich gestützt von Daten und nachgewiesenen Zusammenhängen, die Stand der Wissenschaft sind.

Die beschriebene Situation mit der Phase I (Bildung und Anreicherung) und der Phase II (Auswahlprozess) zeigt, dass der Vesikelbildung mit einer chemischen Evolution von Peptiden eine besondere Bedeutung zukommt. Somit haben geotektonische Rahmenbedingungen mit der Bildung von Kavitäten in der kontinentalen Kruste zu langlebigen Selektionsprozessen beigetragen, die eine Fülle an vorsortierten Molekülen bereitstellten. Um die weiteren Entwicklungsschritte besser verstehen zu können, ist es hilfreich, sich zunächst einmal von der anderen Seite zu nähern, von der Seite des bereits bestehenden Lebens. Gehen wir von unseren heutigen komplexen Verhältnissen zurück in Richtung Ursprung, stellt sich die Frage, ab welchem Punkt der Entwicklung von einem Start des Lebens gesprochen werden kann. Hierfür steht allerdings das grundlegende Problem im Raum, das es, wie in Abschn. 1.2 beschrieben, keine Definition für das Leben an sich gibt, die allgemeingültig ist und von allen Wissenschaftlern akzeptiert wird. Dies hängt unter anderem mit der Sichtweise der unterschiedlichen Disziplinen zusammen. Während die Physikochemiker auf die Besonderheit der Kopplung von Ordnung, Energie und Entropie abzielen, geht es den Biologen mehr

um die Informationsweitergabe bei der Replikation, den Stoffwechsel, die Bildung von Kompartimenten, die Regulation und andere wesentliche Eigenschaften des Lebens. Weitere Definitionen beziehen sich auf Aspekte der Selbsterschaffung und Selbsterhaltung eines abgeschlossenen Systems. Sie alle zeigen, dass der Versuch, das Leben zu definieren, lückenhaft und umstritten ist. Von diesem Ausgangspunkt aus wird ersichtlich, dass eine Definition über den Beginn, der bislang nicht einmal konkret gefasst werden konnte, fast unmöglich scheint. Trotzdem werde ich im Rahmen des vorgestellten hypothetischen Modells den Versuch unternehmen, die Anfangsentwicklung des Lebens einzugrenzen und hieraus einen möglichen Start zu diskutieren. Als Grundlage sollen die von den Biologen aus dem Blickwinkel des existierenden Lebens definierten Schlüsselmerkmale gelten.

Da wir uns jetzt rückwärtsgewandt dem entscheidenden Punkt der Lebensentstehung nähern, müssen wir die auf Phase II chronologisch nachfolgenden Phasen III und IV überspringen. In diesen Zeitscheiben verstecken sich Anfänge, die leichter zu erkennen sind, wenn das Endergebnis bereits sichtbar geworden ist. Die entsprechenden Phasen III und IV, die den Schlüsselprozess zur Datenspeicherung zeigen, werden in den anschließenden Kapiteln nach der Phase VI betrachtet.

Mit der Phase V tauchen wir in eine Zeit ein, die, von den Modellvorstellungen aus gesehen, bereits hinter dem entscheidenden Durchbruch in den Reaktionsabläufen der Moleküle liegt. Den Durchbruch definiere ich als das Auftreten einer Molekülgruppe in höheren Konzentrationen, die aus zwei Transport-RNAs (tRNAs) und zwei Enzymen (Synthetasen) besteht, die die Fähigkeit haben, jeweils eine der beiden tRNAs spezifisch zu beladen. Weiterhin gehört hierzu eine RNA, die enzymatisch aktiv ist und einem Vorläuferribosom (rRNA) entspricht. Die Informationen

der beiden Synthetasen sowie der beiden tRNAs und der rRNA sind in einer RNA gespeichert. Diese RNA ist der Informationsspeicher, dessen Funktion erst viel später von der DNA übernommen wird. Die beiden Synthetasen sind, und dies ist das Besondere, jeweils aus nur zwei Aminosäurespezies (Glycin und Alanin) zusammengesetzt, allerdings jede mit einer anderen Sequenz und Größe. Die Beladung der tRNAs mit einer Aminosäure erfolgt spezifisch von der einen Synthetase mit Glycin, und von der anderen mit Alanin. Alles befindet sich zu diesem Zeitpunkt in großer Anzahl in dem offenen System einer Störungszone in unterschiedlichsten Kavitäten. Es ist vielleicht nicht auf Anhieb ersichtlich, aber mit einer derartigen Ausstattung beginnen die Prinzipien des Lebens das erste Mal zu greifen.

Es lohnt sich, vor einer näheren Betrachtung für diesen besonderen Stand der Entwicklung noch einmal einen Vergleich aus der Technik zu bemühen, am besten aus der spielerischen Sicht einer Lego-Welt. Wir schauen auf eine kleine Fabrik, in der zwei verschieden große Roboterautomaten tätig sind. Sie sind aus der Kombination von lediglich zwei Grundbausteinen zusammengesetzt, aus einem Legobausatz, der nur Sechser- und Achterbausteine zur Verfügung hat. Sogar die Farbe der Bauteile (rot und weiß) ist bei beiden gleich, sodass sich die Roboter nur in der Reihenfolge der verwendeten Bauteile, in der Größe und der Aufgabe der auszuführenden Arbeit unterscheiden. Die Aufgabe des kleinen Roboters ist es, aus einem bunt gemischten Legohaufen immer wieder die roten Sechserbausteine herauszugreifen und auf einen hierzu passenden Transporter zu legen. Die gleiche Aufgabe hat der große für die weißen Achterbausteine. Die vielen beladenen Transporter haben jeweils einen Barcode als Kennung, der speziell auf die transportierte Ware zugeschnitten ist.

Sie wandern auf eine Maschine zu, von der sie aufgrund ihres Barcodes erkannt werden. Die Maschine baut nach Vorgabe eines aus einem Ingenieurbüro stammenden Bauplans ununterbrochen neue Roboter aus Sechser- und Achterbausteinen zusammen. Es sind im Wechsel die beiden Robotertypen, die eingangs die Transporter beladen haben. Hierfür ist es notwendig, die richtigen Bauteile in der richtigen Reihenfolge für den passgenauen Zusammenbau auszuwählen. Je nach Bedarf lässt die Maschine den zugehörigen Transporter an ein Fließband heran, auf das die Sechser oder Achter entladen werden. Dort wird das neue Bauteil an schon vorab zusammengefügte Teile angeknüpft, genau nach Vorgabe des Bauplans. So entstehen ununterbrochen neue Roboter, solange die Zulieferung an Bauteilen erfolgt. Die neugebauten Roboter übernehmen nach ihrer Fertigstellung die gleichen Aufgaben wie ihre älteren Kollegen. Um keinen Engpass im Transportwesen zu bekommen, müssen in einem anderen Teil der Fabrik auch fortwährend neue Transporter gebaut und mit dem passenden Barcode versehen werden. Das ist das Bild eines sich selbst aufbauenden Systems, dass bei Zufuhr von ausreichenden Komponenten sich selbst erhält und darüber hinaus noch vermehrt. Die Roboter bauen sich selbst nach.

Der Prozess in einer Störungszone ist verständlicherweise wesentlich komplexer, könnte aber folgendermaßen aussehen: In der Fülle des Molekülangebotes der Autoklaven gelingt es den Synthetasen (unseren beiden Robotern) immer wieder, ihre spezifische Aminosäure (Glycin bzw. Alanin) auf die zugehörige tRNA zu laden. Die Transporter gelangen durch schwache Strömung zu einer der RNAs und nehmen in der Reihenfolge, wie sie von den Codons vorgegeben wird, darauf Platz. Hilfestellung liefert hierbei bereits eine enzymatisch aktive RNA (rRNA), die als eine Art Vorläuferribosom

(V-Ribosom) angesehen werden kann. Die Aminosäuren werden mit Hilfe des V-Ribosoms nacheinander verknüpft und bilden so die Synthetasen nach, die von dem RNA-Speicher vorgegeben sind und dem Zyklus vorangingen. Die RNA selbst, in der auch die Informationen der tRNAs enthalten sind, kann aber auch durch Anlagerung von komplementären Nukleotiden kopiert werden. Hierzu ist ein Zwischenschritt erforderlich, der über die Bildung eines komplementären Strangs erfolgt (Negativabdruck), von dem anschließend die Reihenfolge der Basen durch erneute komplementäre Anlagerung übernommen wird. Somit bleiben alle wesentlichen Bausteine des Zyklus – Synthetasen, tRNAs, V-Ribosom und die informationstragenden RNAs – erhalten. Und weil die Nachbildung schneller vonstattengeht als der Zerfall, vermehren sich alle Komponenten zusätzlich.

Die Beschreibung der Prozesse in den Kavitäten zeigt sehr vereinfacht ein Modell, das weit reichende Konsequenzen für die Diskussion um die Entstehung des Lebens hat. Es ist daher wichtig, die einzelnen Schritte in der Argumentationskette im Detail anzusehen, um zu verstehen, welche Faktoren hierfür zum Tragen gekommen sind. Nach wie vor geht es um ein offenes Störungssystem in der kontinentalen Kruste im Übergangsbereich von überkritischem zu unterkritischem  $\text{CO}_2$ . Und weiterhin geht es darum, dass die Entwicklung, die zu einem ersten lebensähnlichen Prozess führte, nicht in einer Zelle, sondern in einem Verbund von größeren und kleineren Reaktionskammern stattfand. Die wie Autoklaven wirkenden Kavitäten konnten Durchmesser heutiger biologischer Zellen besitzen (Mikroautoklaven), aber auch faustgroße oder mehr flächige, großvolumige Körper ausbilden. Das offene System bot den Vorteil des ständigen Molekülnachschubs und der größeren Fülle an Reaktionspartnern, ohne dass bereits ein entwickeltes „Pfortnersystem“ für

ein abgegrenztes Zellkompartiment erforderlich war. Die Überlegungen führen zu einem prinzipiellen Weg, der nur vereinfacht dargestellt werden kann. Physikochemische Einzelschritte sind hierfür noch nicht bis ins letzte Detail diskutierbar, da die Variationsbreite und die Anzahl der beteiligten Reaktionspartner jede Vorstellung sprengen. Aber es geht um ein Prinzip, das sich ab einem bestimmten Zeitpunkt durchgesetzt haben konnte und bis heute in der Lebenswelt seine Fortsetzung findet.

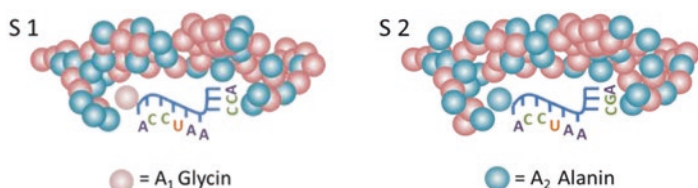
Es ist leicht verständlich, dass die in der Frühphase beteiligten funktionstragenden Moleküle, also die lebensnotwendigen Bauteile einer Zelle, noch nicht die Komplexität besaßen, wie wir sie heute vorfinden. LUCA, die Zelle von der alle heutigen abstammen, gehörte zu den kernlosen Prokaryoten. Aus ihnen entwickelten sich erst Milliarden Jahre später die eukaryotischen Zellen, die einen Zellkern besitzen. Wie auch beim ersten Automobil muss es bei der ersten selbstvermehrenden Zelle eine Minimalausstattung gegeben haben, aus der sich alles Weitere entwickelte. Bevor es aber zu einer Ansammlung aller lebensnotwendigen Einheiten in einer Hülle kam, muss es ein Minimum an Bauteilen gegeben haben, die ein funktionierendes Informationsspeichersystem in Gang setzen konnten (bezogen auf das vorgestellte außerzelluläre Entwicklungsmodell).

Durch das offene System gab es eine kontinuierliche Zu- und Abfuhr von Bausteinen, aber auch zeitlich stationäre Verhältnisse in geschützten Autoklaven, von denen aus ein nur eingeschränkter Austausch mit anderen Räumen möglich war. Wie es zur Bildung der funktionstragenden Moleküle gekommen ist, wird später diskutiert. Die RNA war zu diesem Zeitpunkt (Phase V) so weit entwickelt, dass sie bereits die Informationen der Synthesen, der Transport-RNA (tRNA) und der RNA eines möglichen V-Ribosoms (rRNA) trug.



Die beiden Synthetasen S1 und S2 sind (dem Modell nach) jeweils nur aus den gleichen zwei Aminosäurespezies A1 (Glycin) und A2 (Alanin) aufgebaut (Abb. 8.2). Allerdings variieren A1 und A2 jeweils in der Anzahl und der Reihenfolge, sodass die Synthetasen (unsere Roboter) unterschiedliche katalytische Eigenschaften besitzen. S1 kann zum Beispiel eine ihrer eigenen Aminosäuren (A1, Glycin) spezifisch mit einer der tRNAs verknüpfen, während die zweite Synthetase (S2) die andere Aminosäure (A2, Alanin) spezifisch auf eine zweite tRNA belädt. Dies funktioniert deshalb, weil die Synthetasen bereits eine Erkennungsstruktur für die Bindung einer passenden tRNA (R1 bzw. R2) entwickelt haben. (Alternativ können es mehrere tRNAs gewesen sein, was die Genauigkeit der Zuordnung herabsetzt. Es geht hier im Beispiel aber um die minimale Ausstattung.).

Nach der Beladung der tRNAs (von denen es viele Kopien gibt, die ständig an den Synthetasen beladen werden) gelangen diese in Kontakt zu einer Vorläufer-RNA



**Abb. 8.2** Zwei unterschiedliche Synthetasen, ausschließlich aus den gleichen Aminosäuren Glycin und Alanin bestehend. S1 im spezifischen Kontakt mit einer tRNA, an die Glycin geknüpft wird, und S2 mit einer tRNA, die mit Alanin beladen ist. Die achirale Eigenschaft von Glycin begünstigt die Ausbildung einer Kette mit einer zweiten, chiralen Aminosäure, in der nur D- oder L-Konfigurationen vorkommen (enantiomerenreine Ketten, Darstellung der tRNA nur schematisch). Die Information über die Reihung der Aminosäurespezies ist zu diesem Zeitpunkt bereits in einer RNA hinterlegt

**Abb. 8.3** Proto-RNA-Code für zwei Aminosäurespezies und angehängt der Code für eine tRNA. Die tRNA übt gleichzeitig die Stopp-Funktion im Ableseprozess bei der Translation aus, da aufgrund fehlender spezifischer Aminosäure keine Umsetzung zu einem Peptid erfolgt. Länge der tRNA symbolisch. Die erste RNA, die spezifische Baupläne für zwei Enzyme gespeichert hat (proteingene RNA), wird in der weiteren Entwicklung als Vorlage für die ständige Produktion der beiden ersten spezifischen Synthetasen genutzt. Dies ist möglich, weil die Ablesung der Information aus der RNA (die jetzt vergleichbar ist mit der späteren mRNA) über die Anticodons der tRNA erfolgen kann

Sie reihen sich in den Prozess ein und verknüpfen die mitgebrachten Aminosäuren nach Vorgabe des Informationsspeichers so lange weiter, bis das Ende der RNA für die Synthetase S1 erreicht ist. Es ist ein Vorgang, der in komplexerer Form auch heute in den Zellen abläuft. Die Ursachen für alle Reaktionen liegen in den physikochemischen Gesetzmäßigkeiten, nach denen energetisch niedrigere Niveaus unter Zunahme der Entropie (z. B. durch Wärmeabgabe) eingenommen werden.

Der Strang der Informationsspeicher-RNA (später mRNA) ist in diesem Moment komplett in die Reihenfolge einer Kette aus den beiden verwendeten Aminosäuren übersetzt. Gleiches erfolgt an einer zweiten RNA (für S2) oder gleich parallel zum Verknüpfungsvorgang des ersten Teilstücks S1. Für diesen Fall muss die RNA als zusammenhängender Strang für beide Synthetasen S1 und S2 vorliegen. Hierfür ist allerdings nach dem S1-Abschnitt ein Zwischenbaustein erforderlich, der als Stopp-Element fungiert und die Verknüpfung der Aminosäuren beendet. Gleiches gilt für den RNA-Abschnitt für S2. Der gesamte Vorgang produziert fortwährend Synthetasen mit genau derselben Zusammensetzung, wie sie die beiden ersten Synthetasen besitzen. Sie sterben somit nicht aus, sondern vermehren sich. Voraussetzung ist der ständige Nachschub an Molekülen und eine Replikation der RNA, die die Information der Ketten trägt. Würde die Replikation der RNA ausbleiben, wäre ihre Information nach dem Zerfall verloren.

Ein in dieser Art gestarteter Prozess, der zum Erhalt der wichtigsten Bausteine des Lebens führt, kann als Vorläufer des Prinzips Leben betrachtet werden – allerdings in einem offenen System. Die treibenden Kräfte für diesen Vorgang sind die zyklische Entspannung des überkritischen  $\text{CO}_2$  bei gleichzeitiger Erhöhung der Entropie, die Strömungsturbulenzen und die Wärme übertragenden Prozesse. Als

Motor, der letztlich die Vorgänge für die Entwicklung des Lebens startete, haben wir die von  $\text{CO}_2$ -Gas gesteuerten Geysire identifiziert, die wiederum von der gespeicherten Energie im Erdinneren angetrieben werden. Die Summe der physikalischen Prozesse in einem solchen Geysirsystem ist überraschenderweise vergleichbar mit den Prozessen in einer einfachen Dampfmaschine. Auch dazu später mehr.

Bis hierher ist der Vorgang fast identisch mit den Prozessen der Synthetasebildungen, wie sie in den heutigen Zellen ablaufen. Der Hauptunterschied ist, dass bestimmte Bauteile wie tRNAs, Aminosäuren und Synthetasen auf jeweils zwei Einheiten beschränkt sind. Die Replikation der RNA und die Verknüpfung der Aminosäuren werden heute mit Hilfe von Enzymen gesteuert. Sie ermöglichen eine Reaktion im wässrigen Milieu der Zelle und beschleunigen den Vorgang erheblich. Aufgrund physikochemischer Gesetzmäßigkeiten können die Reaktionen auch ohne Enzym-Katalysatoren stattfinden. Sie dauern aber entsprechend länger, wobei die Gefahr besteht, dass der Zerfall schneller abläuft als die Bildung der Moleküle. Ein Teil der hier aufgezeigten Reaktionen kann neben der Unterstützung eines katalytisch aktiven V-Ribosoms möglicherweise direkt im überkritischen  $\text{CO}_2$  stattfinden.

Wenn wir auf das Beispiel mit den Lego-Robotern zurückblicken, sind wir noch keinen Schritt weiter. Es werden ständig die gleichen Roboter produziert. Es gibt keine neue Entwicklung. Wir können uns an dieser Stelle zurücklehnen und in Gedanken beobachten, wie sich über beliebig lange Zeiträume das System aus zwei Synthetasevarianten, zwei tRNAs, einem einfachen Ribosom und einer RNA am Leben erhält. Bedingung dafür ist, dass der Geysirprozess dauerhaft funktioniert und genügend Bausteine für die Molekülbildung nachgeliefert werden. Ist dies der Fall, wächst die Gemeinschaft der betreffenden

Moleküle, bis die Rohstoffverfügbarkeit eine Grenze setzt. Aber dieser Vorgang, so spannend er erst einmal ist, führt nicht viel weiter. Es muss zusätzlich ein Prozess ins Spiel kommen, der eine Weiterentwicklung der Molekülbildung steuert und eine höhere Komplexität des gesamten Systems nach sich zieht.

Wenn wir uns das offene System der Kavitäten mit allen Stoffaustausch- und Reaktionsprozessen vorstellen, lässt sich erahnen, dass es nicht nur zur Kopie der Synthetasen S1 und S2 mit Hilfe der bestehenden RNA gekommen sein konnte. Es muss gleichzeitig die Möglichkeit gegeben haben, dass sich spezifisch beladene tRNAs auch ohne RNA-Strang-Vorlage entweder mit Hilfe des V-Ribosoms oder aber selbstständig aneinanderlagerten. Die mitgebrachten Aminosäuren Glycin und Alanin wurden in diesen Fällen zu zufällig sortierten Ketten verknüpft. Hiermit war noch nicht viel erreicht. Aber es tat sich eine neue Möglichkeit auf, die der weiteren Entwicklung einen starken Impuls gab.

Schauen wir wieder vorab auf die Lego-Welt. In der Fabrik werden durch immer mehr arbeitende Roboter immer mehr Transporter beladen, die nicht alle zum Fließband gelangen. Es gibt einen Raum, in dem die Transporter in zufälliger Reihung aufgestellt werden und ihre Bausteine abgeben müssen. Bei der Abgabe werden sie zu wilden, zufälligen Konstrukten zusammengesteckt und ab einer bestimmten Größe ins Freie entlassen. Irgendwann zerfallen sie wieder und die Einzelteile werden auf die Haufen gelegt. Es ist eigentlich ein überflüssiger Prozess, der nur Ressourcen verbraucht. Aber davon gibt es genug. Ab und zu werden von einigen Transporterreihen allerdings die Barcodes gescannt und im Büro an den Bauplan für die Roboter angehängt. Das hat Folgen für die Produktion. Von dem ergänzten Bauplan werden künftig nicht nur die Roboter zusammengebaut, sondern auch

die zufällig zusammengewürfelten Konstrukte, die keine Funktion haben. Der Vorgang läuft sehr lange; immer wieder entstehen unbrauchbare zufällige Konstrukte in allen Variationen. Viele davon gelangen durch den Scan in den Bauplan. Aber plötzlich ist eine Version dabei, die einen neuen Roboter bildet. Er wird auch aus dem roten Sechser und dem weißen Achter zusammengebaut. Aber er ist anders als die anderen beiden. Er kann einen anderen Legostein, den grünen Vierer, auf einen neuen Transporter legen. Aber der wird doch gar nicht gebraucht. Die Transporter mit dem Vierer bekommen folglich keinen Platz in der Maschine, die die Roboter baut. Dem Bauplan nach werden hier nur Roboter aus Sechsern und Achtern gebaut – ab sofort allerdings drei verschiedene Typen. Aber es gibt jetzt eine neue Möglichkeit. In dem Raum, in dem die überzähligen Transporter aufgereiht werden, stehen jetzt neben denen mit weißen und roten Steinen mehr und mehr Transporter, die grüne Vierer geladen haben. Sie stammen von dem dritten Roboter. Hieraus ergibt sich eine völlig neue Mischung. Wie vorher werden die Bausteine zu wilden Konstrukten verknüpft, die keine Funktion haben. Einige von ihnen werden wieder gescannt und an den Bauplan aus dem Büro angehängt. Und dann, nach sehr vielen Konstrukten, ist eins dabei, das wieder einen neuen funktionsfähigen Roboter ergibt. Er besteht aus weißen, roten und grünen Bausteinen. Sein Bauplan ist gescannt und an den Hauptplan angehängt. So kann er wie die anderen Roboter ständig nachproduziert werden. Seine Fähigkeit besteht darin, einen blauen Zweier auf einen passenden Transporter zu laden ...

Zurück zu den Kavitäten der Störungszonen: Bei jedem zufällig gereihten Verknüpfungsschritt liegen die Anticodons der tRNAs eine kurze Zeit nebeneinander und bilden eine Vorlage (Template), die durch komplementäre Nukleotide ergänzt werden kann (Abb. 8.4). Schließen



verknüpften Aminosäureketten hatten keinerlei Funktion. Aber es steckte in ihnen ein großes Potential, da sie mit einer fast unbegrenzten Vielfalt an Variationen auftraten. Die Speicherung ihrer Sequenz in einer parallel gebildeten RNA bot die Chance, dass sie immer wieder neu gebildet wurden und nicht verloren gehen konnten. Wurden später einige der Proteine als Funktionsträger entdeckt, hatten sie die Möglichkeit, sich sofort durchzusetzen. Diese Situation erklärt nach meiner Auffassung am ehesten die geforderte schnelle Entwicklung der Proteine als Funktionsträger für die künftigen Zellen.

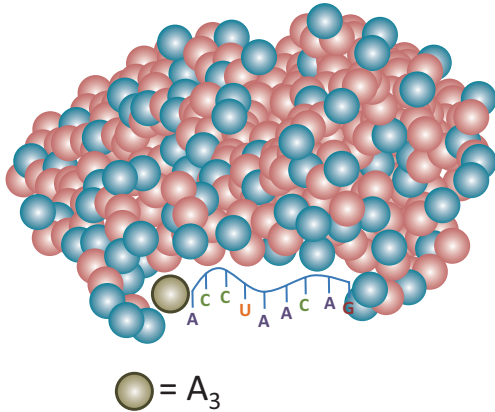
Für den Fall, dass ein V-Ribosom bei der zufälligen Verknüpfung Unterstützung leistete, bedeutet dies, dass die Anlagerung der Nukleotide an die Anticodons der sich zufällig aneinanderreihenden tRNAs nicht völlig dem freien Raum überlassen wurde. Die Verknüpfung erfolgte entsprechend mehr oder weniger gezielt durch die katalytische Funktion des einfachen V-Ribosoms. Das kann bedeuten, dass es vielleicht mindestens zwei verschiedene V-Ribosome gegeben hat. Das eine katalysierte die Bildung der Synthetasen durch Ablesen der Information aus einer der frühen RNAs, das andere die Bildung von zufälligen Aminosäureketten ohne jegliche Informationsvorlage. Bei der zufälligen Bildung der Aminosäureketten wäre damit aber gleichzeitig die Dokumentation der zufälligen Reihung in einer RNA möglich gewesen. Vielleicht war aber auch nur ein Ribosommolekül vorhanden, das in der Lage war, beide Funktionen zu erfüllen.

Im weiteren Verlauf, vielleicht nachdem sich die molekulare Entwicklung nur noch in einer Zelle vollzogen hatte, war möglicherweise die freie Kombination von tRNAs eingeschränkt oder unterbunden. Die Bildung neuer RNA am Ribosom war dann nicht mehr möglich. Stattdessen konnten die vorhandenen RNA-Stränge als Informationsträger für die Verknüpfung der Peptide



genutzt werden, so, wie es heute ausschließlich im Ribosom erfolgt (die Peptidsynthese, bei der die mRNA in dem Ribosom als Informationsträger für die Verknüpfung der Peptidkette dient). Heute müssen die ankommenden tRNAs warten, bis sie für den passenden Code auf der mRNA zugelassen werden. Erst dann erfolgt die Verknüpfung der mitgebrachten Aminosäure. In dem anderen postulierten Fall der zufälligen Reihung mussten die ankommenden Nukleotide warten, bis sie einen Platz an dem Anticodon der tRNAs besetzen konnten.

Bei jeder Bildung eines Peptids mit zufälliger Aminosäurenreihung entsteht ein Vertreter einer ungeheuer großen Zahl an Variationen, die zu fast 100 % keine Funktionen haben. Sie gehen wieder verloren, wenn sie nicht, wie beschrieben, in seltenen Fällen mit ihrer Sequenz in einer RNA gespeichert werden. Unter diesen können Proteine sein, die sich falten und zu katalytisch aktiven Enzymen entwickeln. Ein Funktionsenzym wäre zum Beispiel eine dritte spezifische Synthetase, die die spezifische Beladung einer weiteren tRNA ermöglicht (Abb. 8.5). Die dritte tRNA kann aus Mutationen hervorgegangen sein, bei der im Anticodon eine Base ausgetauscht wurde. Zusammen mit der neuen Synthetase käme hierdurch eine dritte Aminosäure ins Spiel (der grüne Legostein), die bei der zufälligen Aneinanderlagerung der tRNAs eine weitere Steigerung der Variationsmöglichkeiten mit sich bringt (Abb. 8.6). Das Interessante an diesem Vorgang ist, dass die neue Synthetase immer noch aus nur zwei Aminosäurespezies besteht (Glycin und Alanin), aber eine dritte Spezies exakt an eine tRNA verknüpft. Ist die Information über die Sequenz der Aminosäuren der neuen Synthetase in einer parallel gebildeten RNA gespeichert, kann diese, wie auch die dritte tRNA, an bereits bestehende RNAs angehängt

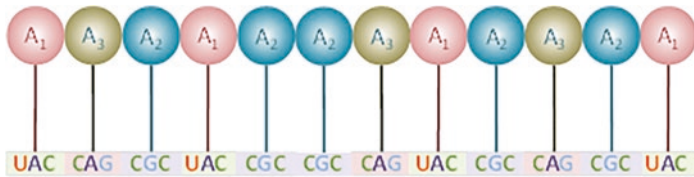


**Abb. 8.5** Eine neu entstandene tRNA-Synthetase aus einer zufälligen Kombination von A1 und A2, die zu einer spezifischen Bindung für A3 und Verknüpfung mit einer dritten tRNA führt. Mit dieser dritten Synthetase kommt eine dritte Aminosäure ins Spiel, die spezifisch auf eine tRNA geladen werden kann. Hiermit steigt die Variationsmöglichkeit bei weiteren zufälligen Verknüpfungen, sodass auf gleichem Weg mit der Zeit eine vierte, fünfte etc. Synthetase gebildet wird, deren Information über die Sequenz in einer parallel gebildeten RNA speicherbar ist

werden. Die gewachsene RNA steht fortan für Kopien aller Bausteine inklusive der dritten Synthetase bereit.

Damit können wir für die Entwicklung bis zu diesem Schritt festhalten: Es liegen die Informationen von drei Synthetasen (noch aus zwei Aminosäurespezies aufgebaut) in einer RNA vor, die die spezifische Verknüpfung von drei Aminosäuren auf drei unterschiedliche tRNAs vornehmen können. Weiterhin stecken Informationen der drei tRNAs in der verlängerten RNA (und nach wie vor die Informationen zum V-Ribosom).

Spätestens an dieser Stelle hatten sich die stapelweise bemalten Zettel auf der Suche nach einer Lösung gelohnt. So langsam sickerte eine Ahnung durch, dass das Henne-Ei-Problem lösbar sein musste, zumindest auf dem



**Abb. 8.6** Beispiel einer Kette mit drei unterschiedlichen Aminosäuren, die spezifisch auf tRNAs geladen wurden (tRNAs nur schematisch mit Anticodons dargestellt). Mit 3 Aminosäuren und 12 Einheiten ergibt sich bereits eine Kombination aus 531.441 unterschiedlichen Möglichkeiten

Papier. Schlagartig wurde in diesem Moment klar, welche Kombinationsmöglichkeiten sich aus dem beschriebenen Verfahren ergeben. Einerseits war die zufällige Bildung einer Vielzahl von Proteinen vorhanden, mit gleichzeitiger Speicherung ihres Aufbaus in einer RNA, andererseits bestand die Chance, aus diesen Proteinen weitere Synthesen zu bekommen, die ebenfalls zu einer spezifischen Beladung einer tRNA führen konnten.

Mit der erfolgreichen Bildung einer dritten Synthetase, die für die dritte spezifische Beladung einer weiteren tRNA zur Verfügung steht, bietet sich noch einmal eine enorme Steigerung der Variationsmöglichkeiten bei der freien Kombination der tRNAs an. Mit der Potenz von  $3^n$  ergeben sich bei der Verknüpfung von 3 verschiedenen Aminosäuren in einer Kette mit 15 Einheiten mehr als 14 Millionen verschiedene Möglichkeiten. Die Zusammensetzung der dritten Synthetase ist in diesem Entwicklungsstadium in der RNA gespeichert, sodass sie ständig nachgebildet werden kann. Von jetzt an ist die freie Zuordnung von beladenen tRNAs mit drei Aminosäurespezies zur Bildung von Peptiden möglich. Auch

hierbei läuft wieder der gleiche Vorgang ab. Es entstehen fast nur neue Ketten, die unbrauchbar sind, aber auch einige, die wieder Funktionen übernehmen können. Hier ist eine vierte Synthetase dabei, diesmal aus drei verschiedenen Spezies aufgebaut, die eine vierte Aminosäurespezies spezifisch auf eine weitere (mutierte) tRNA belädt. Wieder kann diese Synthetase gleichzeitig in einer RNA abgespeichert werden. Jetzt kann sich jeder leicht ausrechnen, wie es weitergeht. Die nächsten Variationen werden immer komplexer, mit maximal so vielen Aminosäuren, wie im Umfeld zur Verfügung stehen.

An dieser Stelle ist es vielleicht angebracht, eines noch einmal deutlich zu machen: Es laufen in dieser Phase zwei Entwicklungen parallel nebeneinander ab. Die eine Entwicklung garantiert den Erhalt und die Vermehrung der Synthetasen sowie der tRNAs, RNAs und der V-Ribosomen, die andere nutzt die Möglichkeit unendlicher Kombinationen zur Bildung neuer Peptide, deren Information gleichzeitig in einer RNA abgespeichert werden kann. Gelingt die Speicherung nicht, hat das Peptid keine Zukunft. Mit diesem Konstrukt eines Lebenslaboratoriums bekommt man erstmals eine Ahnung, wie die hochkomplexen Molekülzusammensetzungen in unendlichen Variationen ausprobiert und über die RNA gespeichert werden konnten. Dass nicht alle Variationen hierbei zum Zuge kamen, erklärt schon die große Zahl der Möglichkeiten. Es reichte, wenn eine Variante, die gleichzeitig in der RNA gespeichert wurde, eine Funktion in dem komplexen System übernehmen konnte. Dann griff das Prinzip der Auslese und das Molekül bekam eine Zukunft.

**Wie können wir uns die Situation räumlich vorstellen?**

Die Druckschwankungen in Folge eines gasgetriebenen Geysirausbruchs wirken sich je nach Höhe der ausgeworfenen Wassersäule in der Tiefe auf einen Krustenabschnitt von mehreren Hundert Metern aus. Das bedeutet, dass unterhalb der Grenze von ca. 800 m, vielleicht bis 1100 m, jedes Mal alle vorhandenen überkritischen Autoklaven unterkritisch werden. Dies führt zu turbulenten Durchmischungen. Von den Seiten strömen aus höheren Positionen kühleres Wasser in Richtung Aufstiegskanal und aus der Tiefe steigen verstärkt überkritische Gaströpfchen in die Grenzzone auf. Seitwärts gerichtete Strömungen und kreuzende Wegsamkeiten führen zur Verbreitung der neu entstandenen Moleküle. Einmal begonnen, reichen die Molekülkonzentrationen aus, um ständig Synthetasen nach Vorlage der in der RNA gespeicherten Information zu produzieren, die RNAs zu kopieren und neue zufällige Aminosäuresequenzen innerhalb sich bildender Peptide zu probieren. Das System ist dynamisch und sehr langlebig. Geben wir dieser Molekülsuppe in Gedanken mehrere Millionen Jahre Zeit, lässt sich leichter verstehen, dass sehr viele Variationen ausprobiert werden konnten, und das an Zehntausenden Kaltwassergeysiren gleichzeitig, die aufgrund der anfänglich hohen Gasmengen aus dem Mantel sicher zahlreich entlang der Störungszonen verteilt gewesen waren. Am Ende reichte es, dass an einer Stelle die Kombinationen der Molekülbildungen und Verknüpfungen erfolgreich waren und der Durchbruch gelang.

Ein Problem muss bei all dem noch gelöst werden: Die Produktion vieler Enzyme ohne Funktion führte zu einer möglichen Datenspeicherung von unnützem Material. Diese Daten wurden aber genauso wieder abgelesen wie die der Enzyme mit Funktion, die später zum Einsatz

kamen. Wie wurden die brauchbaren Synthetasen aus dem Pool der gesamten Enzyme herausselektiert?

Eine Erklärung könnte sein, dass nur ein Bruchteil aller zufällig gebildeten Peptide auch gleichzeitig eine Speicherung in einer RNA erfahren hat, der wahrscheinlichste Fall. Auf der anderen Seite existiert im Genom der Eukaryoten eine Vielzahl von DNA-Abschnitten, die nicht kodierend sind, das heißt, sie werden nicht für die Bildung der Proteine benötigt. In der DNA des Menschen sind es immerhin 95 %. Ein Teil dieser nicht kodierenden Abschnitte enthält die Vorlage für die tRNAs und die ribosomale RNA. Trotzdem gibt es einen großen Prozentsatz der DNA, dem keine Funktion zugeordnet werden kann. Sie wird als junk DNA oder Schrott-DNA bezeichnet. Dieser Prozentsatz hat sich in den letzten Jahren verringert, da immer mehr Anteile der sogenannten junk DNA für bestimmte Prozesse als notwendig erkannt wurden. Ein großer Teil scheint allerdings nach wie vor keine Bedeutung zu haben. Inzwischen gibt es zu diesem Thema unter den Wissenschaftlern zwei gegensätzliche Lager. Die Verhältnisse sind lange nicht geklärt. Vielleicht ist eine der Ursachen die Speicherung der Informationen der zufällig angefallenen Peptide. Der Anteil nichtkodierender DNA in Bakterien und Archaeen ist deutlich geringer. Er liegt unter 20 %. Die Vertreter dieser Domänen besitzen eine eher ringförmige DNA, in der das Vorhandensein von unnützer DNA schnell nachteilig wäre. Die Entwicklungslinien von Bakterien und Archaeen haben sich früh von derjenigen der Eukaryoten getrennt. Vielleicht haben sie kurz danach eine Möglichkeit entwickelt, sich des Großteils der überflüssigen RNA/DNA zu entledigen. In der Linie der Eukaryoten, deren DNA seilförmig mit einer komplexen Wickelstruktur ausgebildet ist, wäre dieser Prozess entsprechend nicht erfolgt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die junk

DNA sekundär bei den Eukaryoten Einzug gehalten hat, weil Systeme zur Abwehr von Retroviren versagten. Die Retroviren nisteten sich in der DNA ein, vermehrten sich und übernahmen schließlich Funktionen. Es ist auf jeden Fall spannend, die bestehenden Fragen mit einem neuen Ansatz zu betrachten.

Das Spiel mit den zufälligen Kombinationen der beladenen tRNAs für die Peptidbildung lässt sich jetzt bis zur 20. Synthetase wiederholen. Allerdings ist davon auszugehen, dass mit dem vermehrten Eintritt von Enzymen in die gesamte Entwicklung andere Prozesse zur Bildung der Synthetasen beigetragen haben, sodass der aufgezeigte Weg überwiegend für die Anfangsphase mit Aminosäuren aus dem hydrothermalen Umfeld gelten würde. Hiermit lässt sich jedenfalls die Bildung der wichtigsten Enzyme bei gleichzeitiger Informationsspeicherung in einer RNA in relativ kurzer Zeit erklären. Nebenbei kann eine riesige Auswahl an weiteren Peptiden und Enzymen erklärt werden, deren Aufbau in manchen Fällen mit in der RNA gespeichert wurde, obwohl sie keine Funktion einnahmen. Die funktionslosen Abschnitte konnten möglicherweise in einer späteren Phase durch Mutationen verändert werden, sodass Enzyme gebildet wurden, die für neue Erfordernisse zur Verfügung standen.

## 8.5 Phase VI – LUCA wird sichtbar

Eigentlich hätte der Vorgang der Synthetasenbildung und der passenden Zuordnung zu einer tRNA bis zur Zahl von mindestens 60 weitergehen können (Variation möglicher Dreiercodons aus den vier Basen:  $4^3 = 64$  Möglichkeiten, abzüglich 4 Funktionscodons). Dies ist nicht erfolgt. Als Alternative ist eine Mehrfachbelegung der tRNAs entstanden, die bis zu 6 „Codewörter“ für eine Aminosäure ausmacht (z. B. wird Serin über sechs verschiedene

Basentriplets codiert). Erklären lässt sich dieser Stopp vielleicht mit einer grundlegenden Veränderung in der Entwicklung des gesamten Prozesses. Es könnte bedeuten, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt, bei Existenz einer Mindestanzahl aus den heutigen 20 Synthetasen, ein Übergang von den weiten Räumlichkeiten der Autoklaven zu den Engen der Zellkompartimente erfolgte. Wie in dem Versuchsablauf der Vesikelbildung beschrieben, können viele Molekülbausteine aus den Autoklaven durch die Druckabnahme im System (z. B. durch Ausbruch des Geysirs) in die kondensierenden Tröpfchen bzw. Protozellen gelangen. Dieser Vorgang erfolgte vielleicht 50 Mal am Tag in Milliarden von Autoklaven, während Tausender Jahre. Es ist leicht abzuschätzen, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt, nach unendlichen Versuchen in einigen Fällen alle Bausteine, die für eine biologische Zellentwicklung erforderlich waren, gleichzeitig in eines dieser Vesikel gelangten. Notwendig hierfür waren zuerst die RNA mit allen gespeicherten Informationen über die notwendigen Bauteile sowie das V-Ribosom, darüber hinaus die tRNAs, Synthetasen und Enzyme, die sich als hilfreich beim Kopieren der RNA erwiesen. Besonders wichtig waren Enzyme, die Ionenkanäle in der Zellhülle bildeten, um einen Stofftransport von außen nach innen und von innen nach außen zu gewährleisten. Andere Enzyme, die die Produktion der Bausteine für die Zellhülle steuerten, waren ebenfalls für die weitere Entwicklung von größerer Bedeutung. Diese Bausteine waren alle sofort nötig.

### **Eisen-Schwefel-Cluster**

Eine frühe Rolle konnte bei der Entwicklung der ersten Zelle die Bildung von Eisen-Schwefel-Clustern (Fe-S-Cluster) gespielt haben, die sich über Cystein, eine Aminosäure mit einem eingebauten Schwefelatom, zu strukturierten

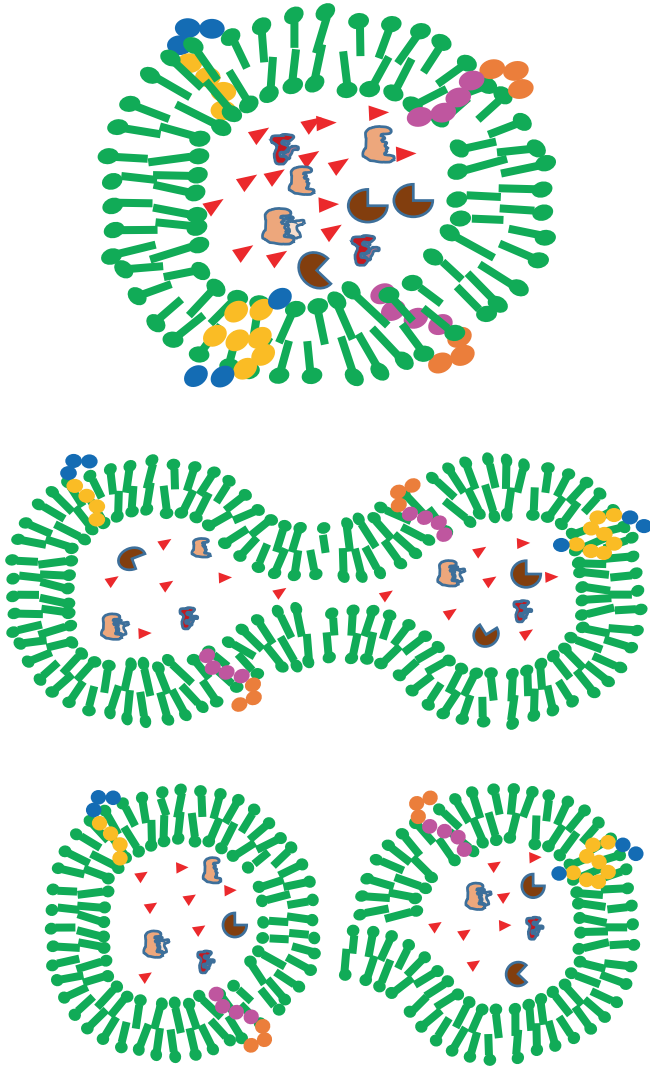


Peptiden verbanden. Fe-S-Cluster sind vermutlich die ältesten in der Natur vorkommenden Biokatalysatoren. Eine häufige Form ist das würfelförmige Cluster mit jeweils 4 Eisen- und 4 Schwefelatomen. Es erinnert an das Mineral Pyrit, dem Günter Wächtershäuser eine große Bedeutung in der Biogenesediskussion eingeräumt hat. Fe-S-Proteine sind an vielen Schlüsselprozessen der Zelle beteiligt, wie z. B. der Photosynthese, der Biosynthese von Aminosäuren, Nukleinsäuren und Proteinen. Dies zeigt eine große Bedeutung für die Lebensfähigkeit der Zellen und ist ein Hinweis darauf, dass die ersten Cluster sehr früh an der Entwicklung beteiligt gewesen sein müssen. Aus ihnen hat sich in Verbindung mit komplexen Enzymen im Lauf der Evolution eine große Zahl an Funktionsmolekülen entwickelt. Durch die Fähigkeit des Eisens, sowohl Elektronen abzugeben als auch aufzunehmen ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , Reduktion und Oxidation), kam ihnen vermutlich zuerst eine wichtige Funktion in Abläufen zu, bei denen Redoxprozesse eine Rolle spielten. Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) ist ein Mineral, das an vielen Stellen unter sauerstofffreien Bedingungen unter anderem aus hydrothermalen Lösungen in Spalten kristallisieren kann. Die Ausgangsstoffe können dort in einem weiten Konzentrationsbereich vorliegen. Im Reagenzglas lassen sich unter sauerstofffreien Bedingungen bei höheren Eisen- und Schwefelkonzentrationen entsprechende Cluster in Proteine einbauen. Unterstützende Enzyme sind hierzu nicht erforderlich [7, 8]. Die Konzentrationen von Eisen- und Schwefelionen in dieser Größenordnung wäre allerdings in freier Form für die heutigen Zellen tödlich. Für das offene System der Mikroautoklaven in den Störungszonen gab es aber andere Voraussetzungen. Dies zeigt einmal mehr den Vorteil der Molekülentwicklung außerhalb eines Zellkompartiments, bei der von ganz anderen Stoffumsätzen und Konzentrationen ausgegangen werden kann.

Mit dem ersten erfolgreichen Akt der Platznahme aller erforderlichen Moleküle in einem Vesikel standen schließlich alle notwendigen Bausteine für eine weitere Entwicklung sofort zur Verfügung, und das in einem großen Überschuss, da wesentlich mehr Moleküle aufgenommen

werden konnten, als notwendig waren. Mit ausreichender Zufuhr notwendiger Bausteine von außen, z. B. durch Ionenkanäle, waren von diesem Zeitpunkt an die Voraussetzungen für die Vermehrung aller Teile in einem eng begrenzten Raum gegeben. Als „Rohstoffe“ von außen standen Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ), Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), Phosphat ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), metallische Kationen und organische Moleküle zur Verfügung.

Die Verhältnisse im Inneren des Vesikels/der Zelle führten zu einer ständigen Vervielfältigung aller Komponenten, einschließlich der Moleküle, die die Zellmembran aufbauen, sodass sie insgesamt wachsen konnte. Ab einer bestimmten Größe reichten eine leichte Auslängung und geringe Scherkräfte durch Turbulenzen im Wasser, damit die Wandung in der Mitte zusammentraf und eine Brücke ausbildete. Wir kennen dieses Bild in großer Ausführung aus den Fußgängerzonen, in denen manchmal Akteure für das Laufpublikum gegen etwas Kleingeld riesige Seifenblasen erzeugen. Die bis metergroßen Blasen verformen sich schnell bei leichtem Wind, werden zum Teil wurstartig ausgelängt und treffen in der Mitte mit ihren Rändern aufeinander. Manchmal trennen sie sich hierdurch und bilden zwei eigenständige Blasen. Ähnlich ist die Teilung der ersten Zellen in zwei etwa gleich große Einheiten anzunehmen (Abb. 8.7). Das Angebot an vorab vervielfältigten Komponenten war hierbei so groß, dass alle wichtigen Moleküle in großer Überzahl in beiden Zellen vorhanden waren. Es gab noch keine steuernden Enzyme, die die Produktion in effiziente Bahnen lenkte. In beiden Zellen setzte sich der Prozess der Molekülzufuhr, Vervielfältigung und des Wachstums fort, sodass sich nach kurzer Zeit jede Zelle wieder auf gleiche Weise teilen konnte. LUCA war geboren und hatte begonnen, sich zu vermehren (wobei es keine Unterscheidungsmöglichkeit



**Abb. 8.7** Beispiel für die Teilung eines Vesikels durch Scherung bei Strömungsturbulenzen nach Platznahme aller notwendigen Molekülbausteine, die sowohl Moleküle der Vesikelhülle, Proteine der Zellhülle als auch alle weiteren notwendigen Bausteine duplizieren können. Durch mehrfaches Überangebot an notwendigen Molekülen liegen auch nach der Teilung genügend Bausteine in jeder Teilzelle vor, sodass der Prozess der Molekülvermehrung bei beiden weiter stattfinden kann

in Mutter- und Tochterzelle nach der ersten Teilung gibt). Dieses Bild verdeutlicht, dass sich bereits zur Startphase in jeder der beiden Zellen eine unterschiedliche Anzahl der kopierten Zellbausteine befand und dass die Zusammensetzung von Zelle zu Zelle allein hierdurch unterschiedlich war. Es war der Start für eine konkurrierende Entwicklung von Beginn an. Darüber hinaus konnte parallel zur ersten Teilung immer wieder aufs Neue der Initialvorgang der Platznahme geeigneter Komponenten in einem Vesikel in großer Anzahl stattfinden. Das bedeutet, die Chance für den Neustart weiterer Zellen bestand über lange Zeit fort. Jede neue, sich teilende Zelle hatte eine leicht andere Zusammensetzung im Vergleich zur ersten, genau so, wie sich die Tochterzellen von LUCA unterschieden. Aber die Informationsstruktur, dokumentiert durch die RNA, war im gesamten System und somit in allen sich bildenden Zellen gleich. Aus diesem Blickwinkel ist es nicht eindeutig, dass es genau eine erste Zelle gab, von der alle weiteren in allen Domänen abstammen. Hiernach ist es eher wahrscheinlich, dass es eine Gruppe, eine große Anzahl ähnlicher Zellen war, die parallel entstanden und zwischen denen es vielleicht zu einem Austausch von Komponenten kam. Allen gemeinsam waren der Ursprungsort und der im offenen System gebildete Informationsspeicher.

Von diesem Zeitpunkt an, mit der beengten Entwicklung innerhalb eines Kompartiments, war die Zufuhr an Bausteinen im Vergleich zu vorher eingeschränkt, das System Zelle aber bereits funktionsfähig. In der Folge muss die Entwicklung neuer Synthetasen anderen Gesetzmäßigkeiten unterlegen haben. In der RNA lagen zum Beispiel viele gespeicherte Informationen von Peptiden vor, die keinerlei Funktion besaßen. Mutationen in den zugehörigen Abschnitten der RNA und später der DNA durch die wesentlich höheren Konzentrationen

radioaktiver Elemente dieser Zeit wirkten sich auf die Zusammensetzung der Peptide aus. Es war von jetzt an eine bedeutende Möglichkeit der Veränderung, die zu funktionalen Enzymen führen konnte.

Das in diesem Kapitel beschriebene Modell ist stark vereinfacht und klammert eine Vielzahl von Detailfragen aus, deren Erforschung noch aussteht. Hierfür bietet das kontinentale Krustenmodell mit seinen bekannten Rahmenbedingungen genügend Möglichkeiten. Es muss mit viel mehr beteiligten Molekülpartnern gerechnet werden, wodurch die Variationsbreite und die erforderliche Zeit zum Ausprobieren und Kombinieren steigt. Es zeigt aber auf, dass es Lösungswege für das viel diskutierte Henne-Ei-Problem gibt. Im Folgenden muss noch die Lücke geschlossen werden, die zwischen der Bildung der Ausgangsmoleküle mit den Selektionsprozessen durch die zyklische Vesikelbildung (Phase II) und dem postulierten Start des Lebens (Phase V) mit der spezifischen Beladung von tRNAs liegt.

### **Dissipative Systeme**

Das Leben scheint auf den ersten Blick allen thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten zu widersprechen. Organismen erzeugen Konzentrations- und Temperaturunterschiede und bauen entgegen der physikochemisch zu fordernden Entropiezunahme geordnete Strukturen auf. In diesen Strukturen nimmt die Entropie lokal ab, was nur durch einen Austausch mit der Umgebung möglich ist. Dies geschieht zum Beispiel durch Abgabe von Wärme, welche die Größe der Entropieabnahme in der Struktur kompensiert bzw. übersteigt, an das umgebende System. Somit liegt nach dem Austausch in der Summe eine höhere Entropie vor als vorher. Um den Vorgang der Strukturbildung (also die Prozesse des Lebens) aufrechtzuerhalten, wird ein ständiger Energieumsatz benötigt, etwas, das nur in einem offenen System gewährleistet werden kann. Geschlossene

Systeme streben ein Gleichgewicht an, in dem keine Lebensentwicklung denkbar ist.

Mit dem Durchströmen von Energie in einem System wird die Bildung eines Gleichgewichtszustandes verhindert. Es entstehen dafür Unordnung und Chaos. Das Faszinierende hieran ist, dass innerhalb solcher chaotischer Systeme spontan neue Strukturtypen entstehen können, die wiederum Ordnung und stabile Strukturen aufweisen. Sie wurden von dem russisch-belgischen Physikochemiker Ilya Prigogine (Nobelpreis für Chemie 1977) als dissipative Strukturen bezeichnet. Ein überzeugendes Beispiel ist die Erdoberfläche gemeinsam mit der Atmosphäre. Sie bilden ein offenes, energieaustauschendes (dissipatives) System, das weit entfernt von einem Gleichgewicht steht. Es nimmt Energie in Form von Sonneneinstrahlung auf und strahlt Wärme in den Weltraum ab. Innerhalb dieses chaotischen Systems bilden sich ständig dissipative Strukturen wie Wolken, Wirbelstürme oder auch Flüsse. Prigogine spricht von einem dissipativen Chaos, dem er eine Schlüsselrolle zuschreibt. Er ordnet es ein zwischen den reinen Zufall und die redundante Ordnung und wertet es als Bedingung zur Entstehung von Information in biologischen Systemen [9]. Thermodynamisch bilden die von Gasen durchströmten Bruchzonen der kontinentalen Kruste ein offenes System mit Energie- und Materiezufuhr sowie einem Entropiefluss, der besonders am Übergang vom überkritischen zum unterkritischen Gas deutlich wird. Es handelt sich um ein dissipatives System, in dem dissipative Strukturen wie Vesikel, Peptide oder RNA entstehen können. In einem geschlossenen System ist die Bildung der Bausteine des Lebens in der notwendigen Qualität und Quantität nicht denkbar. Das bedeutet: Wäre eine Entwicklung von RNA und Proteinen primär auf ein Zellkompartiment beschränkt gewesen, hätte von Beginn an die Zellmembran ein offenes System garantieren müssen, so, wie wir es heute mit Einbau von Membranproteinen in die Zellhülle kennen. In der Phase VI des hypothetischen Modells ist die erste Zelle mit einem Vielfachen aller Funktionsmoleküle, die einen Beitrag zur Vervielfältigung des Vesikels liefern können, dargestellt. Sie dokumentiert den Übergang vom offenen System, in dem es eine hohe Freizügigkeit an Energie, Entropie und Materie gibt, zu einem eng begrenzten Kompartiment. Es wird schnell deutlich, dass der Start des Lebens, der erste gelungene Teilungsprozess, der die

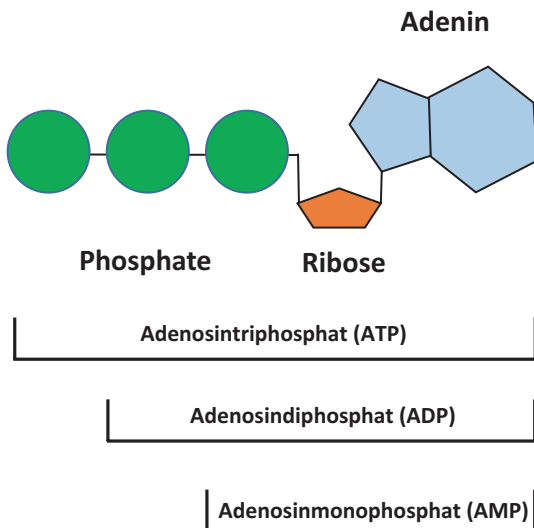
Entwicklung des Lebens begründete, nur mit Membrankomplexen erfolgen konnte, die das Kompartiment Zelle als ein offenes System erhielten.

## 8.6 Phase III – Anleihen an die RNA-Welt

Wir haben nach dem Kapitel über die Auswahlprozesse der Moleküle in Phase II einen großen Sprung getan und die wichtigen Phasen III und IV zur beginnenden Informationsspeicherung ausgelassen, um sie jetzt mit diesem und dem folgenden Kapitel nachzuholen. Es war wichtig, die weitere Entwicklung bis zur Bildung von LUCA vorab zu erkennen, um ein Verständnis davon zu erhalten, auf welche Besonderheiten die Zwischenphasen III und IV abzielen. Sie beschreiben die wichtigsten Zwischenschritte, die die Voraussetzung für die exakte Beladung der tRNA geschaffen haben. Ein bedeutender Zwischenschritt ist die Bildung einer RNA, um die es zunächst geht.

Im Kapitel der verschiedenen Modelle zur RNA-Welt habe ich deutlich gemacht, dass eine zufällig gebildete RNA nicht in der Lage ist, Enzyme zu katalysieren, die gleichzeitig bis zu 20 verschiedene Synthetasen bilden. Hierzu sind verschiedene, bislang unbekannte Zwischenschritte erforderlich. Das Ribosom hatte ich als großes Funktionsmolekül beschrieben, das die Verknüpfung der Aminosäuren zu Peptiden organisiert. Unter bestimmten Umständen besitzt die RNA des Ribosoms die Möglichkeit, sich selbst zu vervielfältigen und gleichzeitig katalytisch tätig zu werden [10]. Dies wird von den Vertretern der RNA-Welt als wichtigstes Argument für den Start des Lebens in Verbindung mit der RNA-Entwicklung

angeführt. Erforderlich hierfür sind die Verfügbarkeit von RNA-Bausteinen sowie „energetragende“ Moleküle, die zum Zusammenbau der Bausteine zu einem Strang benötigt werden. Die energiereichen Moleküle sind, einfach gesagt, Sprossenteile der RNA aus Base, Zucker und Phosphat, an die zwei weitere Phosphate angehängt sind. Heute sind es z. B. Adenosintriphosphat (ATP, Abb. 8.8) und Guanosintriphosphat (GTP), in seltenen Fällen auch Triphosphate der anderen Basen. An dem Phosphat des Nukleotids (Base-Zucker-Phosphat, B-Z-P) hängen jeweils zwei weitere Phosphate (B-Z-P-P-P). Weiterhin müssen Bedingungen vorliegen, die einerseits eine Mindestlänge eines RNA-Strangs ermöglichen und andererseits ihren schnellen Zerfall verhindern.



**Abb. 8.8** Beispiel eines energetragenden Moleküls Adenosintriphosphat (ATP). Es ist ein RNA-Baustein aus der Base Adenin und dem Zucker Ribose, mit dem statt einem insgesamt drei Phosphate verknüpft sind. Die Abspaltung eines oder zweier Phosphate liefert Energie, die in der Zelle für die Verknüpfung anderer Moleküle zur Verfügung steht



In unseren Laboratorien in Essen haben Versuche in Autoklaven unter hohem Druck mit überkritischem  $\text{CO}_2$  und unterkritischem Wasser erste Erfolge bei der Verknüpfung von Basen mit Zucker (Ribose) und Phosphat ergeben (Analysen Prof. O. J. Schmitz, Applied Analytical Chemistry). Die Strangbildung selbst steht vor der Erforschung. Als günstig für die Stabilität der RNA erweisen sich hierbei die Bedingungen in der Kruste. Untersuchungen von Järvinen et al. [11] belegen, dass bei einer Temperatur von 90 °C die größte Stabilität der RNA zwischen pH 4 und pH 5 liegt, genau dem Bereich, der in 1000 m Tiefe mit einem Überschuss an  $\text{CO}_2$  und variierenden  $\text{N}_2$ -Konzentrationen seitens des pH-Wertes plausibel ist.

In alkalischen Wässern der „White Smoker“ mit pH-Werten größer als 9 besteht dagegen keine lange Überlebensdauer der RNA bzw. kaum eine Bildungschance. Ähnlich sieht es mit den trockenfallenden Tümpeln aus, deren pH-Werte im Normalfall über 7 liegen. Anders verhält es sich mit der Stabilität der DNA. Sie hat ihr Optimum bei höheren pH-Werten im neutralen Bereich. Hierin könnte in der späteren Entwicklung der Übergang von der RNA zur DNA als Speicher begründet liegen. Alle Produkte, die sich in der Tiefe bildeten, wurden durch Aufstieg der Wässer in höhere Stockwerke transportiert und durch Geysireruptionen direkt auf die Oberfläche katapultiert. Hierdurch gelangten auch die ersten Zellen in höhere Zonen, in denen je nach Verhältnissen höhere pH-Werte vorliegen konnten. Die Ursache war der Zutritt von Oberflächenwässern mit höheren pH-Werten, der die Werte der Mischwässer insgesamt erhöhte.

Mit sinkenden Temperaturen unterhalb von 90 °C, wie sie in der für uns interessanten Tiefe anzunehmen sind, erhöht sich die Stabilität der RNA noch weiter. Unter Berücksichtigung der höheren Krustentemperaturen

in der Frühzeit der Erde und den Temperaturschwankungen durch die Phasenübergänge der Gase kann ein Temperaturfenster von ca.  $30 \pm 10$  bis  $70 \pm 10$  °C in 1000 m Tiefe abgeschätzt werden. Das bedeutet, die RNA liegt an dem postulierten Ort ihrer Entstehung in einem Stabilitätsoptimum, wodurch das Überleben längerer Stränge auch für einen größeren Zeitraum gegeben ist. Gefördert wird die Stabilität weiterhin durch das Auftreten von Magnesiumionen ( $Mg^{2+}$ ) [12] und Bor. Magnesium wird in der Kruste durch Auflösung von Olivin bereitgestellt. Olivin ist eines der Hauptminerale basaltischer bzw. gabbroider Gesteine und wird in allen tieferen Bereichen der Störungszonen angetroffen. Gabbros sind chemisch mit Basalten verwandt, aber durch langsame Abkühlung und Kristallisation in der Tiefe mit größeren Kristallen ausgestattet. Die hydrothermalen Lösungen zersetzen Olivin und andere magnesiumhaltige Minerale leicht, sodass Magnesiumionen in hoher Anzahl zur Verfügung stehen. Bor ist bedeutend für die Stabilität der Ribose, des in der RNA verwendeten Zuckers [13]. Es bildet in Verbindung mit anderen Ionen verschiedene Minerale, die überwiegend unter ariden Bedingungen in übersalzten Becken kristallisieren. Es wird dagegen in Minerale, die aus Magmen kristallisieren, nur sehr geringfügig eingebaut. Bor ist in wässrigen Fluiden hochlöslich und findet sich deshalb angereichert in Restlösungen kristallisierender Magmen und in hydrothermalen Wässern. Die Konzentrationen der verschiedenen Ionen in den Fluiden der Störungszonen variieren mit der Stärke des Gasanstieges bzw. des Zustroms an Wasser aus der Tiefe und dem Anteil des Wasserzutritts von der Erdoberfläche. Es kann auf jeden Fall vorausgesetzt werden, dass es Milieus in den kontinentalen Störungszonen gab, in denen ausreichend Bor als stabilisierendes Element für die RNA zur Verfügung stand.

Es gibt eine intensive Diskussion, ob die präbiotische Welt Möglichkeiten bereitstellte, die Bildung einer RNA-Welt zu unterstützen. Hierzu stellte Szostak [10] acht Problempunkte zusammen, die aus seiner Sicht mit Hilfe neuer Ideen und Forschungsansätze gelöst werden können. Ein wichtiger Punkt ist das strukturelle Verhalten von längeren RNA-Strängen. Sie tendieren dazu, umzuklappen, sich an passenden Stellen zusammenzulagern und Doppelstränge auszubilden. In diesen Abschnitten stehen sie nicht mehr als Vorlage für eine Kopie zur Verfügung und müssen zu diesem Zweck erst wieder getrennt werden. Die Bindungen sind allerdings so stabil, dass für ein Auftrennen höhere Temperaturen von mehr als 60° C notwendig sind [14]. Dieses Temperaturumfeld ist aber schädlich für manche Lipide, von denen einige als erste Protozellbausteine angenommen werden.

Wie oben beschrieben, treten in den kontinentalen Störungszonen mit Kaltwassergeysiren während der zyklischen Übergänge von überkritischem zu unterkritischem Gas größere Temperaturunterschiede auf. Die plötzliche Gasbildung führt zu einer Ausdehnung und begleitender Temperaturabnahme von >20° C. Die umgekehrte Situation erfolgt mit dem erneuten Druckaufbau durch zusammenlaufendes Wasser in der überstehenden Wassersäule, die zu einer Temperaturerhöhung durch komprimierte Gase führt. Es werden kurzzeitig Werte erreicht, die deutlich oberhalb der mittleren Temperatur von 40 bis 50 °C liegen. Hiermit werden die im Labor ermittelten Werte von über 60 °C für eine RNA-Replikation unter realistischen Bedingungen erreicht, und das mit jedem von dem Geysirsystem vorgegebenen Zyklus. Gleichzeitig sind die in der Essener Arbeitsgruppe untersuchten Vesikel in einem Temperaturfeld noch weit oberhalb von 60 °C stabil [15].

In verschiedenen Labors weltweit werden Experimente durchgeführt, bei denen  $Mg^{2+}$ - und  $Zn^{2+}$ -Ionen als unterstützende Faktoren für die Bildung von RNA-Matrizen (Templates) dienen sollen. Die dafür notwendigen hohen Konzentrationen von z. B. Magnesium stören an anderer Stelle. In den Wässern der Störungszonen können sowohl hohe als auch niedrige Magnesiumkonzentrationen vorliegen. Sie fehlen im überkritischen  $CO_2$ , in dem keine anorganischen Stoffe gelöst werden. Organische Basen sind schwach hydrophob, sodass sie sich im überkritischen  $CO_2$  anreichern können. Die bei Druckabfall gebildeten Nebeltröpfchen bilden einen Reaktionsraum, der viele Variationen für mögliche Verbindungen zulässt. In der Kombination des überkritischen  $CO_2$  und des Wassers in den Mikroautoklaven, den zyklischen Temperaturschwankungen und den für die Stabilität der RNA optimalen pH-Werten müssen bei konstanter Molekülzufuhr der notwendigen Bausteine und stabilisierender Ionen alle Voraussetzungen für den Start einer RNA-Welt in der kontinentalen Kruste gegeben gewesen sein. Es ist eine Aufgabe der nächsten Jahre, diese RNA-Welt im Labor unter den simulierten Krustenbedingungen zu bestätigen.

Im Moment ist es eine indiziengestützte Annahme für den Zwischenschritt in Phase III des hypothetischen Modells. Dazu gehört, dass sich in einem offenen System einerseits eine RNA bilden konnte und andererseits Bedingungen gegeben waren, die ihre Vervielfältigung ermöglichten. In den hochdynamischen Störungssystemen mit einer hohen Konzentration radioaktiver Elemente ist eine hohe Veränderungsrate mit den ersten Kopiervorgängen anzunehmen. Es ist die entscheidende Voraussetzung für das Modell, denn dadurch lässt sich der Prototyp einer Transport-RNA erklären, deren Varianten die ersten Aminosäuren zu Enzymen zusammenführten.

Es wird deutlich, dass die Bildungsbedingungen für eine RNA in der kontinentalen Kruste hinsichtlich Stabilität und Ausgangsstoffen sehr günstig waren. Die RNA-Entwicklung konnte parallel zur Vesikelbildung und der chemischen Evolution von Peptiden erfolgen, was eine Vielzahl von Rückkopplungseffekten möglich machte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Die hydrothermale Chemie in den Störungszonen liefert die Ausgangsstoffe für die Bildung von Nukleotiden, die zu RNA-Strängen im Grenzbereich  $\text{üCO}_2/\text{gCO}_2$  verknüpft werden können.
- Die pH-Werte der wässrigen Umgebung sowie Magnesium- und Bor-Ionen bieten für die Stabilität der RNA optimale Bedingungen.
- Eine Doppelstrangbildung der RNA, die die Bildung von Kopien verhindert, wird durch zyklische Temperaturerhöhungen nach Geysireruptionen aufgelöst. Anschließend ist die Anlagerung komplementärer Nukleotide und somit der Kopierprozess möglich. Diese Prozesse finden besonders effektiv im Umfeld von Nebeltröpfchen der Gasphase des  $\text{CO}_2$  statt.
- Hohe Gehalte an Radionukliden führen durch ionisierende Strahlung zu vielen Mutationen, wodurch neue RNA-Varianten gebildet werden.

Nach Überlegungen von Christian Mayer konnte die chemische Evolution der Peptide, die in Zusammenhang mit der Vesikelbildung stattfand, auch dazu führen, dass energiereiche Moleküle wie Adenosintriphosphat (ATP) oder Guanosintriphosphat (GTP) gebildet wurden. Dies sind die beiden Hauptenergieträger bei Stoffumsätzen in den Zellen. Heute werden über Konzentrationsunterschiede von Ladungsträgern ( $\text{H}^+$ ) innerhalb und außerhalb einer Zellmembran einzelne RNA-Bausteine (z. B. das Nukleotid Adenosinmonophosphat) mit Hilfe eines sehr

komplexen Enzymsystems mit zusätzlichen Phosphatmolekülen beladen. Hierdurch entstehen energiereiche Moleküle, die an anderer Stelle wieder unter Energiegewinn von ein oder zwei Phosphatmolekülen befreit werden. Der Beladungsvorgang ist komplex, das oben genannte Enzymsystem ist vergleichbar mit einer mechanischen Turbine, die in der Zellmembran durch den  $H^+$ -Gradienten angetrieben wird [16]. In der Anfangsphase gab es dieses Enzym noch nicht, aber es entwickelten sich in unendlicher Vielzahl Peptide, die in der Vesikelhülle Platz nahmen und zum Teil Ionenkanäle bildeten. Hiermit konnte ein Austausch der  $H^+$ -Ionen erfolgen und möglicherweise zur Entstehung energiereicher Formen der Peptide führen.

Auf Grundlage der Überlegungen von C. Mayer sind Experimente geplant, bei denen die chemische Evolution auf Basis der Vesikelbildung mit den Mechanismen der RNA-Bildung gekoppelt werden soll. Es wird sich zeigen, ob es eine Bildung von ATP oder anderen Triphosphaten als Energieträger gegeben haben könnte, die einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung des Lebens haben liefern können. Mit der Verfügbarkeit z. B. von ATP in der Anfangsphase der Lebensentwicklung wäre der Startschuss für die effiziente Verknüpfung von Nukleotiden zu RNA-Strängen gefallen. Wir gehen davon aus, dass bei der richtigen Auswahl möglicher anorganischer und/oder organischer Verbindungen in den Experimenten eine Stranglänge gebildet werden kann, die ribosomale Eigenschaften zulässt. Ab diesem Zeitpunkt kann geklärt werden, ob neben der Eigenkopie auch weitere RNA-Moleküle wie tRNA katalysiert werden können.

Die Bildung der Vesikel hätte somit mehrfachen Anteil an der Entwicklung des Lebensprozesses: mit der Auslese spezieller Peptide/Proteine über die Eigenschaften der Vesikelhüllen, der Erstellung von ATP/GTP als wichtigste Energiebausteine und später schließlich mit

der Bereitstellung der Zelle an sich, aus der LUCA startete. Die Zerschlagung der Vesikel durch die zyklischen Druckschwankungen führte bei jedem Phasenübergang zur Freisetzung der Peptide und der ATP-Moleküle, die im offenen System der Mikroautoklaven weiter reagieren konnten. Somit stellt sich das System der Vesikelbildung als eine der wichtigsten Produktionsstätten für molekulare Bausteine dar, die auf dem Weg zur Entstehung des Lebens benötigt wurden.

## 8.7 Phase IV – der Lückenschluss

Mit der Bereitstellung und Auslese langer Peptide/Proteine durch die Membranen der Vesikel bildeten sich immer wieder ähnliche Proteine, die in Abhängigkeit von der Vesikelhülle, der verfügbaren Aminosäuren und der physikochemischen Rahmenbedingungen unterschiedlichen Gruppen angehörten. Hinzu kamen längere Aminosäureketten, die unabhängig hiervon im Wasser und  $\text{üCO}_2$  bzw. deren Grenzflächen gebildet wurden. Zur Verfügung standen 10 bis 12 in hydrothermalen Systemen vorkommende Aminosäurespezies. Es muss allerdings bei der Kettenbildung eine deutliche Häufung der am meisten vorhandenen Spezies Glycin und Alanin gegeben haben. Im sauren Milieu der Krustenfluide wurde der gleichzeitige Einbau von L- und D-Konfigurationen der Aminosäuren unterdrückt, sodass vereinzelt enantiomerenreine Proteine entstehen konnten. Sie wurden gefaltet und bekamen zum Teil katalytische Eigenschaften. Während der gesamten Abläufe waren die Anteile der Proteine mit L-Händigkeit genau so häufig wie die mit einer D-Händigkeit. Es gab zu diesem Zeitpunkt noch keine Festlegung auf die heutige L-Konfiguration der Aminosäuren.

Diesem schon relativ klaren Bild über die Entwicklung der Proteine steht ein noch etwas unscharfes gegenüber, das die Bedeutung und Möglichkeiten der RNA zu dieser Zeit betrifft. Das liegt daran, dass erst in Zukunft mit den inzwischen gut bekannten Rahmenbedingungen Experimente durchgeführt werden können, die einzelne Schritte in der Entwicklung der RNA-Welt in hydrothermalen Störungszonen belegen können. International sind in den letzten Jahrzehnten bereits Teilergebnisse zur RNA-Welt erzielt worden, die im Folgenden mit als Grundlage für die weiteren Betrachtungen herangezogen werden.

Zum Lückenschluss: Für die weitere Entwicklung in den Kavitäten wird die Bildung einer selbstreplizierenden RNA parallel zur Bildung der Vesikel und Proteine vorausgesetzt, wie sie für die RNA-Welt beschrieben ist. Die ersten RNA-Stränge besaßen noch keine Information, die für die Bildung von Peptiden verwendet werden konnte. Nur die eigene Konfiguration wurde mit jedem Kopierprozess abgerufen. Aus der Vielzahl der Kopien unter hoher radioaktiver Beeinflussung in der Frühzeit der Erde lässt sich eine Fülle an Variationen erwarten, die zu immer neuen Kombinationen führten.

An dieser Stelle setzt das Modell an. Hierin ist vorgesehen, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt eine RNA so modifiziert wurde, dass die beiden Enden zum Teil aus komplementären Basen bestanden, sodass sie sich zu einem Doppelstrang verbinden konnten. Die nicht zueinander passenden Teile lagen in der Mitte, wodurch dieser Abschnitt zu einer Art Schlaufe verbogen wurde. Die zusammenhängenden Enden waren nicht gleich lang, drei Nukleotide ragten wie ein Sporn über den Bereich des Doppelstrangs hinaus. Ähnliche Strukturen von RNA-Molekülen lassen sich heute leicht im Labor erstellen und sind nichts Ungewöhnliches. Letztendlich konnte mit der beschriebenen Modifikation der RNA das Grundgerüst



eines Moleküls entstehen, das in der weiteren Entwicklung die Funktion der Transport-RNA (tRNA) übernahm. An dem Sporn bestand die Möglichkeit, eine Aminosäure zu verknüpfen, und in der stärksten Umbiegung der Schlaufe lagen drei Basen, die sich aus räumlichen Gründen als Informationsblock eigneten. Durch zyklische Temperaturerhöhungen bis zur Schmelztemperatur konnte der Doppelstrang getrennt und hierdurch immer wieder kopiert werden. Hierbei entstanden Mutationen, die sich überwiegend auf den Bereich ohne Doppelstrangbildung auswirkten. Der Sporn veränderte sich nicht mehr.

Die in dieser Form gebildete tRNA war das Schlüssel-molekül schlechthin. Es konnte in eine Wechselwirkung mit Enzymen aus der Vesikelbildung treten und hierbei mit einer Aminosäure beladen werden. Gleichzeitig war am anderen Ende ein chemisches Modul vorhanden, dass als Code genutzt werden konnte. Es reizt an dieser Stelle wieder einen Vergleich aus der Technik anzuführen. Wir kennen alle die nützliche Erfindung der Industrienorm. Damit ist es den Firmen z. B. möglich, über standardisierte Verbindungen regional hergestellte Geräte überall einzusetzen. Wenn wir uns das tRNA-Molekül anschauen, scheint diese Idee schon extrem alt zu sein. Die tRNA gehört mit zu den ältesten Funktionsmolekülen überhaupt. Es muss von Beginn an eine Kontaktstelle zur Aufnahme einer Aminosäure gehabt haben, den Sporn, der über den Bereich des Doppelstranges herausragt. Er wird durch eine Nukleotidfolge mit den Basen A-C-C gebildet (Adenin, Cytosin, Cytosin). Die Erfindung dieses „ACC-Anknüpfungsmoduls“ war so grundlegend und erfolgreich, dass es bis heute nicht mehr verändert wurde. Alle biochemischen Prozesse, die mit der Bildung von Peptiden und Proteinen zu tun haben, sind von Beginn an bis heute in jeder einzelnen Zelle über dieses Modul erfolgt. Es ist wie eine einmal normierte

Anhängerkupplung an einer Zugmaschine, an die alle Arten von Anhängern angekoppelt werden können.

Jetzt kommt es darauf an, einen Prozess zu identifizieren, der die Ursache für die Auswahl einer spezifischen Aminosäure ist, die nicht mit jeder beliebigen, sondern mit einer ganz bestimmten tRNA verknüpft wird. Das Ziel ist, wenn wir dem Modell der vorab vorgestellten Phase V folgen, die Bildung von nur zwei Synthetasen aus nur zwei Aminosäuren.

Es kann vorausgesetzt werden, dass nicht jede tRNA mit jedem der zufällig gebildeten Enzyme wechselwirken konnte. Dies ist heute nach Milliarden Jahren Anpassung selbstverständlich. Die Abstimmung der Zugehörigkeiten ist nach dieser langen Zeit in den meisten Fällen äußerst perfekt. Treten Fehler durch Mutationen auf, die die genaue Zuordnung abschwächen, kommt es meist zu Nachteilen und langfristig zum Absterben des Systems. Mit den ersten im Vesikelzyklus gebildeten Enzymen lagen zwar schon komplexere Moleküle vor, die Selektion zu optimalen Werkzeugen, die nur ganz bestimmte tRNAs für weitere Schritte akzeptierten, fehlte aber noch völlig. Von Interesse sind bei den früh gebildeten Enzymen solche, die Synthetase-Eigenschaften besaßen. Das heißt, sie waren durch Faltung so strukturiert, dass sie sowohl eine Tasche für eine bestimmte Aminosäure als auch eine Andockstelle für eine tRNA bieten konnten, wenn auch sehr ungenau. Allerdings war jedes Enzym einzigartig und nach seinem Zerfall wurde kein gleiches nachgeliefert. Hierfür war die Variabilität durch die zufällige Bildung zu groß. Aber es gab für jedes neu gebildete Enzym eine Zugehörigkeit zu einer Gruppe, in der die betreffenden Enzyme ähnliche Eigenschaften besaßen (hydrophob, hydrophil, basisch reagierend etc.). Und jede Gruppe hatte andere physikochemische Eigenschaften, die zu einer groben Vorauswahl für die Art der Aminosäure führte,

die sie elektrostatisch binden konnte. Gleichzeitig gab es von jeder Gruppe aus eine Bevorzugung für bestimmte tRNA-Moleküle, die durch Mutationen eine breite Palette an Variationen boten.

Die Gruppenbildung der Proteine/Enzyme gibt im Zusammenspiel mit verschiedenen tRNA-Molekülen die erste Möglichkeit, eine Sortierung von Aminosäuren aus dem Angebot der Molekülsuppe vorzunehmen. Dies bedeutet für nachfolgende Reaktionen eine Vorfestlegung und Einengung der Variationsmöglichkeiten. Nicht jede tRNA kann von jeder Synthetase mit jeder Aminosäure beladen werden. Auch wenn die Spezifität der Bindungen sehr schwach ist, ergeben sich in der Summe über lange Zeiträume Abläufe, die ähnliche Reaktionsprodukte hervorbringen. Und wir haben viel Zeit.

Die Analyse des ältesten genetischen Code-Anteils in heutigen Zellen zeigt, dass die Aminosäuren Glycin und Alanin und die zugehörigen Codons im genetischen Alphabet sehr wahrscheinlich die Startphase des Lebens mit begründet haben [17]. Glycin ist die am einfachsten gebaute Aminosäure, gleich gefolgt von Alanin. Glycin ist in den heutigen Enzymen mit einem Anteil von 7,5 % und Alanin mit dem höchsten Wert von allen mit 9 % vertreten. Alanin ist hydrophob. Bei Glycin ist es etwas komplexer, da es Unterschiede in den Eigenschaften gibt, die davon abhängen, ob Glycin als freies Molekül oder innerhalb eines Peptids vorliegt. Es kann bedeuten, dass die ersten Verknüpfungen von Aminosäuren zu längeren Ketten nach einer Vorauswahl durch oben beschriebene Prozesse überwiegend aus diesen beiden Vertretern erfolgt sind. Ausschlaggebende Faktoren können die Eigenschaften in Bezug zum Wasser gewesen sein sowie die Quantität der Moleküle.

Wir sind an dieser Stelle in einem völlig ungeordneten Prozess, der auf zufälligen Kontakten von Aminosäuren

mit zufällig gebildeten Proteinen/Enzymen und zufällig gebildeten tRNAs begründet ist. Die tRNA besitzt zwar einen Dreierblock aus Basen (Anticodon), der im weiteren Verlauf ein wichtiger Informationsträger wird, aber in diesem Stadium keinerlei nutzbare Informationen für gezielte Molekülreaktionen enthält. Somit haben wir eine Kopplung von zwei Systemen vorliegen, die nur sehr unspezifische Reaktionen miteinander zur Folge hat (s. Abschn. 8.3). Die Frage ist, wie sich aus ihr eine spezifische Zuordnungsmöglichkeit entwickelt haben kann, die letztlich in eine Speicherung der Information in einer RNA mündete.

Unter den beschriebenen Ausgangsbedingungen stellen sich die möglichen Verhältnisse in einem Mikroautoklaven der kontinentalen Kruste wie folgt dar: Unter den speziellen Bedingungen der Kavitäten bildeten sich Aminosäureketten, die trotz ihrer großen Variation in der Sequenz bestimmten Gruppen von Peptiden/Proteinen angehörten. Die Vesikel sortierten mit Hilfe ihrer Membranen bestimmte Gruppen aus, die eine Wechselwirkung mit den Vesikelhüllen eingingen. Daneben entstanden weitere Gruppen unabhängig von einem Vesikelkontakt. Ab einer bestimmten Länge wurden Enzyme aller Gruppen gefaltet, wodurch sie eine höhere Stabilität erhielten. Sie bestanden aus den im hydrothermalen Umfeld verfügbaren Aminosäuren (ca. 10 Spezies), aber mit einer deutlichen Häufung von Glycin und Alanin. Unter ihnen gab es Enzyme, die katalytische Funktionen besaßen und zur Beladung von tRNAs mit Aminosäuren beitrugen (Synthetasen). Es war der erste funktionale Kontakt der RNA-Welt mit der Protein-Welt.

Innerhalb der Gruppen gab es immer wieder einige Enzyme, die bevorzugt eine Tasche für die Aminosäure Glycin und einen Andockplatz für eine passende tRNA bereithielten, und einige, die das gleiche für die Aminosäure

Alanin zur Verfügung stellten. Da die Zuordnungen nur sehr schwach spezifisch waren, konnten auch andere Aminosäuren vereinzelt die Plätze für Glycin und Alanin einnehmen und auch die tRNAs zum Teil ausgetauscht werden.

Wie müssen wir uns das jetzt vorstellen? Wie konnte unter diesen Rahmenbedingungen ein Peptid bzw. ein Protein gebildet werden, das nur aus den beiden häufigsten Aminosäuren bestand?

Aus der Kombination von Aminosäuren, tRNAs und bestimmten Gruppen von Enzymen entstanden beladene tRNAs, die die Flüssigkeiten der Kavitäten in hoher Konzentration durchströmten. Sie gelangten zu RNA-Strängen, die als Katalysatoren fungieren konnten (V-Ribosome). An ihnen sammeln sich immer wieder die beladenen tRNAs, lagern sich kurz zusammen und verknüpfen die mitgebrachten Aminosäuren. Diese trennten sich von den tRNAs und bildeten nach und nach eine Kette. Glycin und Alanin müssen den Großteil des Angebotes bei diesen Vorgängen ausgemacht haben. Es war eine Frage der Zeit, dass bei den vielen Variationen bei der Kettenbildung solche dabei waren, die aufgrund des Überangebotes nur aus Glycin und Alanin bestanden, die dann gefaltet wurden und ein Enzym bilden konnten. Allerdings muss es trotz niedriger pH-Werte in den Kavitäten vereinzelt auch zu einem gemischten Einbau von L- und D-Versionen der Aminosäuren gekommen sein. Das wäre vielleicht nicht nachteilig gewesen, es gab genügend Möglichkeiten immer wieder neue Variationen auszuprobieren. Aber die Anzahl der Versuche, um ein enantiomerenreines Peptid zu bekommen, wäre derart hoch gewesen, dass die Angelegenheit schnell in einer Sackgasse geendet hätte. Hierbei kommt wieder der glückliche Zufall zu Hilfe, dass Glycin die einzige achirale Aminosäure ist, ihr also keine Händigkeit zugeordnet

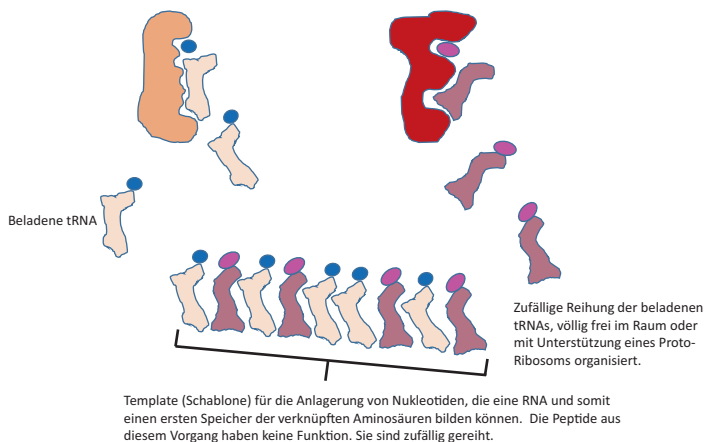
werden kann. Das heißt, die Kombination von Glycin und Alanin musste so lange probiert werden, bis entweder nur D-Alanin oder nur L-Alanin in dem Peptid/Protein vorhanden war. Und das war bei den vermutlich einfach strukturierten Synthetasen mit den zur Verfügung stehenden langen Zeiträumen noch leistbar.

An dieser Stelle fehlt nur noch ein entscheidender Schritt, um das Henne-Ei-Problem einer Lösung zuzuführen. Während die Aminosäuren an dem Hilfestellung leistenden V-Ribosom nach Anlagerung der tRNA verknüpft werden, liegen die jeweiligen drei Basen der tRNA (Anticodon) so günstig, dass sich komplementäre RNA-Bausteine anlagern können. Werden sie verknüpft, bilden sie ein Codon, das das Gegenstück zum Anticodon der jeweiligen tRNA ist. Erfolgt dieser Vorgang bei jedem nachfolgenden tRNA-Molekül, das an dem V-Ribosom andockt, und werden die Codons ebenfalls verknüpft, entsteht nach und nach eine neue RNA.

Was haben wir bis hierher gewonnen? Wir haben rein hypothetisch eine Kette aus nur zwei Aminosäuren gebildet, die eine gewisse Spezifität zu tRNAs zeigen (hierbei war die Anzahl der einsetzbaren tRNAs pro Aminosäure größer als Eins, wie es auch heute bei den meisten Aminosäuren ist). Über die Anticodons der tRNAs hat sich gleichzeitig eine RNA entwickelt, die eine erste Informationseinheit in Bezug zur gebildeten Aminosäurenkette darstellt. (Sollte dieser Prozess einmal im Labor nachvollzogen werden, wäre es an dieser Stelle angebracht, eine Flasche Champagner zu öffnen!) Und das Fazit? Das Fazit lautet: Das wichtigste Molekül des gesamten Lebensprozesses, das tRNA-Molekül, verbindet an dieser Stelle zum ersten Mal über eine logische Verknüpfung die Protein-Welt mit der RNA-Welt.

Und jetzt? Jetzt kann es losgehen. Wir haben genügend Werkzeuge, um die Startphase des Lebens vorzubereiten.

An erster Stelle steht die ständige Bildung von Peptiden/Proteinen, die aus Glycin und Alanin bestehen und eine zufällige Sequenz besitzen. Die Sequenz kann bei entsprechenden Bedingungen gleich in einer parallel gebildeten RNA gespeichert werden (Abb. 8.9). Von sehr vielen zufällig gebildeten Proteinen haben dabei zwei Synthetaseeigenschaften und können Glycin bzw. Alanin spezifisch auf passende tRNAs laden. Wurden die Sequenzen der beiden Synthetasen in einer RNA gespeichert, ist das Überleben gesichert. Hierfür müssen die tRNAs, wie es bis heute geschieht, an den Codons der RNA (heute messenger-RNA, mRNA) andocken und in der darin vorgegebenen Reihenfolge die Aminosäuren zusammenführen. Dies würde wieder mit Hilfe eines V-Ribosoms am elegantesten ablaufen. Die Konsequenz aus der Existenz von zwei spezifischen Synthetasen, die zu einer in einer RNA dokumentierbaren Bildung von Peptiden führt, ist in der Phase V (Abschn. 8.3) beschrieben.



**Abb. 8.9** Paarungen der am häufigsten gebildeten Enzymgruppen mit den am stärksten vertretenen Aminosäuren (Glycin, Alanin) und Beladung der Proto-tRNA mit entsprechender Aminosäure

An dieser Stelle muss spätestens die Entscheidung für das L- oder D-konfigurierte System der Aminosäuren gefallen sein. Beide Systeme liefen bis zu diesem Zeitpunkt parallel. Es könnte allein dadurch erklärt werden, dass in dieser Zeit eine minimal größere Anzahl an L-Alanin in dem System vorhanden war. Dieser kleine Überhang führte dann dazu, dass sich die Kette mit der L-Händigkeit eher zu einem Enzym faltete und somit eher in die Entwicklung von Phase V startete. Das System setzte sich mit der Zeit durch, weil alle nachfolgenden Schritte auf dem Anfang aufbauten. Auf jeden Fall hat die Version gewonnen, deren Vertreter die ersten beiden spezifischen Synthetasen aufgebaut haben. Es ist so gut wie ausgeschlossen, dass dieser Fall gleichzeitig für beide Händigkeiten eintrat. Und mit dem Start des Vermehrungssystems der Synthetasen war der Durchbruch erzielt und der Wettlauf (allein, was den Ressourcenanspruch angeht) gewonnen.

Ich brauche nicht besonders zu erwähnen, dass dieser vereinfachte Vorgang wesentlich komplexer gewesen sein muss, mit vielleicht mehr Aminosäurespezies und mit mehr tRNA-Variationen. Das kann nicht bis zum Letzten diskutiert werden. Es gibt aber den Faktor Zeit, der eine Unzahl an misslungenen Versuchen akzeptiert und Variationen mit Wahrscheinlichkeiten zulässt, die niemals im Labor nachgestellt werden können. Aber es geht um das Grundprinzip, das, einmal verstanden, die wichtigsten Eckpunkte in der Entwicklung des Lebens eingrenzen und überprüfen lässt.

## 8.8 Kann es so gewesen sein?

Wir haben in Gedanken eine Vielzahl von Aminosäuren in Kavitäten der Erdkruste zu Peptiden verknüpft und einen Teil davon über sich fortwährend bildende und wieder zerfallende Vesikel einem relativ groben Sortierungsprozess unterworfen. Die Vorgänge trugen



zu einer Konzentration von bunt gemischten Aminosäuren in Peptiden bei (Phase I). Niedrige pH-Werte führten dazu, dass sich bevorzugt Aminosäuren mit nur einer Orientierung zu Ketten verknüpften. Sobald hieraus längere Peptide entstanden, konnten sich durch Faltung komplexere Strukturen bilden. Im nächsten Schritt erfolgte eine Auslese, die zu einer Peptidbildung mit wenigen, in dem betrachteten Fall mit zwei Spezies führte (Phase II). Parallel hierzu wurde eine ribosomale RNA gebildet, die sich selbst kopieren konnte und aus der tRNAs hervorgingen. Die tRNAs traten in Wechselwirkung mit den fortwährend entstehenden Peptiden aus Phase I, mit der Folge, dass sie jeweils mit bestimmten Aminosäuren verknüpft wurden (Phase III). Ein natürliches Überangebot führte zur bevorzugten Auswahl der zwei einfachsten Aminosäurespezies, die von unterschiedlichen tRNAs transportiert und zu immer neuen Peptiden mit jeweils eigener Aminosäuresequenz verbunden wurden (Phase IV). Hierbei konnten die Anticodons der tRNAs als erste Vorlage für eine sich gleichzeitig bildende RNA genutzt werden. Nach einer unbestimmten Zeit war ein bzw. wenig später waren zwei Enzyme dabei, die die Eigenschaft einer tRNA-Synthetase hatten und deren Sequenzen in einer RNA gespeichert waren. Es mussten solche gewesen sein, die jeweils eine der beiden eigenen, bei ihnen eingebauten Aminosäurespezies katalytisch binden und mit einer der tRNAs verbinden konnten. Der Vorteil war von jetzt an, dass die Abfolge der Aminosäurespezies der beiden Ketten in einer RNA gespeichert war, sodass die Synthetasen fortwährend nachgebildet werden konnten. Parallel hierzu war die freie Anlagerung beladener tRNAs möglich, die zu einer Vielzahl von funktionslosen Peptiden führte. Zum Teil wurden auch deren Sequenzen in einer parallel gebildeten RNA gespeichert. Ab und zu waren Enzyme dabei, die Synthetasecharakter hatten und die spezifische Beladung

einer dritten, vierten, fünften usw. tRNA mit jeweils eigener Aminosäure vornehmen konnten. Erfolgte auch für sie eine parallele Informationsspeicherung in einer RNA, gehörten sie folglich zur Ausstattung des gesamten Systems.

Nach Entwicklung der minimal notwendigen Bausteine für eine sich teilende Zelle war die Chance für den Start gekommen. Es musste nur bei einer der unzähligen Vesikelbildungszyklen die richtige Auswahl an Komponenten gleichzeitig in einer der Protozellen Platz nehmen. Eine wichtige Voraussetzung war, dass die Anzahl der in das Vesikel gelangten Bausteine hierbei wesentlich höher als erforderlich war. Wichtig waren Membranproteine, die einen Durchgang von „Nährstoffen“ und Protonen ermöglichten, sowie die gesamte Maschinerie zur Enzymbildung und Weitergabe der Information. Mit der Versorgung von außen durch die Zellhülle konnten sowohl die komplexen Moleküle des Innenlebens als auch die Lipide der Zellhülle ständig nachgebildet werden. Letzteres führte zum Wachstum der Zellhülle, die ab einer kritischen Größe durch einfache physikalische Scherung geteilt wurde. Die hohe Anzahl aller vorab gebildeten Moleküle sorgte dafür, dass in beiden aus der Mutterzelle hervorgegangenen Teilzellen mehr Bausteine für eine „Grundausrüstung“ zur Verfügung standen, als minimal notwendig waren. Der Teilungsprozess konnte somit kurze Zeit später auf gleichem Weg bei beiden Zellen wiederholt werden. LUCA hatte begonnen, sich zu vermehren (Phase VI).

Es wird deutlich, dass die parallele Entwicklung von Peptiden, Vesikeln und RNA-Molekülen außerhalb eines Zellkompartiments einen großen Vorteil bringt. Die wichtigsten Bauteile liegen in einem offenen System vor und werden von diesem versorgt. Die komplizierten Moleküle für die Funktionen und Abläufe innerhalb einer Zelle spielen erst später eine Rolle. Hierzu gehören die Enzyme, die in der Zellhülle einen Stofftransport ermöglichen,

Gradienten für Energiegewinnung nutzen oder Hilfestellungen beim Herstellen der Moleküle für die Zellhülle sowie der Zellteilung geben. Diese Enzyme bzw. deren Vorläufer konnten sich bereits durch den beschriebenen Vorgang in den Spalten der Kruste entwickeln und in unendlichen Versuchen immer wieder in die zyklisch entstehenden Vesikel eingebaut werden.

In Abschn. 4.1 habe ich auf die Möglichkeit hingewiesen, Informationen über LUCA aus dem Genom der nächstmöglichen Verwandten, wie zum Beispiel methanbildenden Archaeen und anderen Prokaryoten, zu erhalten. Die Untersuchungen haben ergeben, dass LUCA, wie auch nicht anders zu erwarten, anaerob lebte, Kohlendioxid und Stickstoff fixierte, von Wasserstoff abhängig war und eine heiße Umgebung bevorzugte [18]. Benötigt wurden für bestimmte Proteine und Verbindungen Eisen, Schwefel, Molybdän, Nickel und Selen. Alles deutet darauf hin, dass es sich um eine hydrothermale Umgebung gehandelt hat, in der Kohlendioxid, Wasserstoff, Stickstoff, Eisen und weitere Metalle ausreichend vorkamen.

Wenn wir den skizzierten Prozess der Entstehung von LUCA aus der Distanz betrachten, können wir zusammenfassend wieder einen anschaulichen Vergleich zur Technik durchführen. Betrachten wir einen Verbrennungsmotor, der alle Voraussetzungen besitzt, um unmittelbar zu starten. Aber er läuft nicht. Der Grund ist einfach: Es braucht einen Anlasser, der die Maschine in Gang setzt. Vielleicht war es mit dem Leben ähnlich. Vielleicht lagen alle Bausteine an der richtigen Stelle vor, es brauchte nur einen physikalischen Prozess, der Starthilfe gab. Wenn wir die beschriebenen Abläufe in einer gasführenden Störungszone etwas abstrahieren, können wir darin eine Art Dampfmaschine erkennen, die Arbeit verrichtet (Abb. 8.10). Der Heizkessel ist die innere Erde.



Die Rückführung des „Kolbens“ entspricht dem Rücklauf des Wassers, wodurch der Ausgangszustand wiederhergestellt wird. Der Vorgang erfolgt erneut, wenn genügend Energie im System gespeichert ist. Die Taktfrequenz liegt im Zehner-Minuten-Bereich, so, wie wir es von den Geysirausbrüchen kennen. Die Frage ist, welche Arbeit und Energie bei diesen Vorgängen für die chemischen Prozesse eingesetzt werden. Es ist nur ein sehr kleiner Teil: die Erzeugung von Turbulenzen in den Kavitäten und die Leitung von Wärme in die Fluide. Auch hier gibt es keine feste Pleuelstange, die die Kolbenbewegung in Drehbewegung überträgt, es reicht das flüssige, fließende Wasser. Die Turbulenzen und der Phasenwechsel des Gases sind die Ursachen für viele chemische Reaktionen und die zyklische Bildung der Vesikel. Die beliebig zur Verfügung stehenden Energiereserven des Erdinneren (Geysire laufen bereits seit mehr als vier Milliarden Jahren) und die bei jedem Ausbruch extreme Zunahme der Entropie stellen optimale Bedingungen für die Reaktionsabfolgen bereit.

Um es überspitzt zu sagen: Wenn es so war, sind wir letztendlich das Produkt einer Art Dampfmaschine. Und diesem Produkt gelang es nach vier Milliarden Jahren, eine verbesserte Version auf den Markt zu bringen. Sie leitete eine neue Revolution ein, die vielleicht für die nächsten Milliarden Jahre eine ähnliche Bedeutung hat wie die Entstehung des Lebens.

## Literatur

1. Simoneit BRT (2004) Prebiotic organic synthesis under hydrothermal conditions: An overview. *Adv Space Res* 33:88–94

2. Moosmann B (2017) Molekulare Evolution: Redoxbiochemie des genetischen Codes. *BIOspektrum* 23(17):748–751. <https://doi.org/10.1007/s12268-017-0864-7>
3. Süssmuth RD, Mainz A (2017) Nonribosomal Peptide Synthesis – Principles and Prospects. *Angew Chem* 56(14):3770–3821. <https://doi.org/10.1002/anie.201609079>
4. Danger G, Plasson R, Pascal R (2012) Pathways for the formation and evolution of peptides in prebiotic environments. *Chem Soc Rev* 41:5416–5429
5. Eriani G, Delarue M, Poch O, Gangloff J, Moras D (1990) Partition of aminoacyl-tRNA synthetases into two classes based on mutually exclusive sets of conserved motifs. *Nature* 347:203–206
6. Delarue M (2007) An asymmetric underlying rule in the assignment of codons: possible clue to a quick early evolution of the genetic code via successive binary choices. *RNA* 13(2):161–169
7. Beinert H, Holm RH, Munck E (1997) Iron-sulfur clusters: nature's modular, multipurpose structures. *Science* 277:653–659
8. Lill R (2009) Function and biogenesis of iron-sulphur proteins. *Nature* 460:831–838
9. Nicolis G, Prigogine I (1977) *Self-Organization in Non-equilibrium Systems*. Wiley-Interscience, New York
10. Szostak JW (2012) The eightfold path to non-enzymatic RNA replication. *J of Syst Chem* 3(2). <https://doi.org/10.1186/1759-2208-3-2>
11. Järvinen P, Oivanen M, Lönnberg H (1991) Interconversion and phosphoester hydrolysis of 2',5'- and 3',5'-dinucleoside monophosphates: kinetics and mechanisms. *J Org Chem* 56:5396–5401
12. Fischer NM, Polêto MD, Steuer J, van der Spoel D (2018) Influence of Na<sup>+</sup> and Mg<sup>2+</sup> ions on RNA structures studied with molecular dynamics simulations. *Nucleic Acids Res.* 46(10):4872–4882. <https://doi.org/10.1093/nar/gky221>

13. Furukawa Y, Horiuchi M, Kakegawa T (2013) Selective stabilization of ribose by borate. *Orig Life Evol Biosph* 43 (4–5):353–361. <https://doi.org/10.1007/s11084-013-9350-5>
14. Wienken CJ, Baaske P, Duhr S, Braun D (2011) Thermophoretic melting curves quantify the conformation and stability of RNA and DNA. *Nucleic Acids Res* 39(8):1–10. <https://doi.org/10.1093/nar/gkr035>
15. Mayer C, Schreiber U, Dávila MJ, Schmitz OJ, Bronja A, Meyer M, Klein J, Meckelmann SW (2018) Molecular Evolution in a Peptide-vesicle System. *Life* 8(2):16. <https://doi.org/10.3390/life8020016>
16. Yoshida M, Muneyuki E, Hisabori T (2001) Atp Synthase – a marvelous rotary engine of the cell. *Nat Rev Mol Cell Biol* 2:669–677
17. Trifonov EN (2009) The origin of the genetic code and of the earliest oligopeptides. *Res Microbiol* 160:481–486
18. Weiss MC, Sousa FL et al. (2016) The physiology and habitat of the last universal common ancestor. *Nat Microbiol* 1. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.116>



# 9

## Nach LUCA: Wie ging es weiter?

### Inhaltsverzeichnis

9.1	Der Siegeszug beginnt .....	241
9.2	Der Kontakt unterschiedlich entwickelter Zellen ...	244
9.3	Und die Viren? .....	247
	Literatur .....	248

### 9.1 Der Siegeszug beginnt

Es ist leicht vorstellbar, wie die ständigen Geysireruptionen kontinuierlich organische Moleküle und nach Bildung von LUCA auch Zellen an die Erdoberfläche transportierten. Im Umfeld der Austrittsstellen müssen sich „(Bio-)Filme“ aus noch nicht belebten organischen Materialien und später mit ersten Zellen gebildet haben, die unter den neuen Umweltbedingungen kaum Überlebenschancen hatten. UV-Strahlung, Sonnenwind, niedrigere Temperaturen und höhere pH-Werte erforderten eine Anpassung, die



sicher einen längeren Zeitraum benötigte. Darüber hinaus war die Energiezufuhr schwierig. Eine Aufnahme organischer Moleküle aus den vorhandenen Biofilmen war vermutlich erst nach langen Entwicklungsschritten möglich. In der Tiefe der Kruste wurden andere Energieressourcen für die Entwicklung genutzt. Früher oder später können aber klimatische oder regionale Bedingungen dafür gesorgt haben, dass ein Überleben der ersten Zellen auf der Erdoberfläche möglich wurde, sodass sie über Fließgewässer in die Ozeane gelangen konnten. Hierzu stellt sich die Frage, wann der RNA-Speicher von der DNA als Hauptinformationsspeicher abgelöst wurde. Ein Argument wäre die höhere Stabilität der DNA in neutralen bis leicht alkalischen Umgebungen, wie sie an der Erdoberfläche zu finden sind. Inwieweit hiervon eine Rückkopplung auf die Zellchemie wirkt, ist nicht klar. Neben der stabilitätsbegründeten Anpassung muss aber auch ein erweitertes molekulares System gefordert werden, das die Möglichkeiten bereitstellte, ein Doppelstrangsystem zu öffnen, zu kopieren und wieder zu verschließen.

Eine alternative Situation für den Aufstieg der ersten Zellen ist in küstennahen Standorten denkbar, deren offene Störungssysteme direkt in den marinen Raum überleiteten. Der Eintritt in den Ozean war vermutlich der entscheidende Schritt, der den Siegeszug des Systems Leben in Bewegung setzte. Im Ozean trafen die Zellen auf die Gebiete, die ihnen von den physikochemischen Verhältnissen her sehr vertraut waren. Es waren die „Black Smoker“ und andere hydrothermale Quellen, die ihnen unbegrenzte nutzbare Energieressourcen bereitstellten. Gleichzeitig bot dieses Umfeld erneut Schutz vor zerstörerischen Einflüssen, die an der Erdoberfläche vorhanden waren.

Die Inbesitznahme der submarinen hydrothermalen Quellen durch die ersten Zellen führte, zeitlich kompri-

miert betrachtet, vermutlich zu einer explosionsartigen Ausbreitung der ersten Lebensform. Der offene Ozean bot mit Meeresströmungen und ausreichend vielen heißen Quellen hierfür ideale Bedingungen. Große Distanzen und lokale Besonderheiten konnten zu eigenständigen Anpassungen in der jungen Familie der Zellen führen, die somit schnell diversifizierten. In dieser Phase lag das Abklingen der heftigen Meteoriteneinschläge, die überwiegend die Ozeane betrafen. Mit jedem größeren Einschlag wurden weite Bereiche der jungen Kontinente überflutet. Dies war der Weg, auf dem sich die Prokaryoten über alle großen und kleinen Krustenfragmente, die sich inzwischen gebildet hatten, ausbreiten konnten. Überall dort, wo Kontakt zu hydrothermalen Quellen bestand, konnten sie Fuß fassen und sich weiterentwickeln. Während vermutlich vor 3,77 Mrd. Jahren bereits weit fortgeschrittene Bakterien die Oxidation von Eisen als Energiequelle nutzten [1], traten vor mindestens 3,5 Mrd. Jahren erstmals Bakterien (Cyanobakterien) auf, die eine externe Energiequelle erschlossen hatten. Ihre neue Erfindung war ein Molekül, das die Lichtenergie der Sonne in chemische Energie umwandeln konnte. Hierbei wurde zu Beginn Wasserstoff und Schwefelwasserstoff umgesetzt, aber noch kein Sauerstoff erzeugt. Der Start hierfür war wiederum mit einem weiterentwickelten Molekül verbunden, dem Chlorophyll. Der Beginn der Sauerstoffproduktion durch Cyanobakterien (früher als Blaualgen bezeichnet) datiert in die Zeit vor 2,8 Mrd. Jahren [2]. Der Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre begann jedoch erst ab etwa 2,3 bis 2,4 Mrd. Jahren vor heute zu steigen, nachdem ein Großteil der oxidierbaren Komponenten aus den Mineralen ( $\text{Fe}^{2+}$ , Schwefel) mit Sauerstoff reagiert hatte. Ursache für die steigende Sauerstoffproduktion war das vermehrte Auftreten von Stromatolithen, Algenmatten in flachmarinen Bereichen, die bis heute überlebt haben (Abb. 9.1). Und hiermit änderte sich eigentlich alles, was das Leben betrifft.



**Abb. 9.1** Rezente Stromatolithen in der Shark Bay, Westaustralien, im Meerwasser mit hoher Konzentration gelöster Salze. Durch die hohen Salzgehalte werden Fressfeinde ferngehalten

## 9.2 Der Kontakt unterschiedlich entwickelter Zellen

Es mag weit hergeholt scheinen, aber das Stichwort „Krustenfragmente“ inspiriert zu weiteren Überlegungen. Schon früh setzte auf der Erde die Bewegung von Platten ein, die letztlich zur Verlagerung der jungen Kontinente und zu nachfolgenden Kontinent-Kontinent-Kollisionen führte. Inzwischen gilt es als gesichert, dass Organellen wie die Mitochondrien und Chloroplasten der Eukaryoten

von Bakterien abstammen. Es besteht die Vorstellung, dass Bakterien von anderen Prokaryoten aufgenommen wurden, aber nicht verdaut werden konnten. Im Gegenteil: Die aufgenommenen Bakterien lebten in der Zelle des Wirtes weiter und nutzten deren Stoffwechselprodukte für die eigene Versorgung. Es entwickelte sich eine Symbiose, bei der der eine Partner in dem Körper des anderen dauerhaft lebte, wie die Bakterien in unserem Darm. Die evolutive Anpassung führte dazu, dass die eingeschlossenen Bakterien sich im Rhythmus der Wirtszelle ebenfalls teilten und nach und nach zu nützlichen Bausteinen reduziert wurden. Sie leisten für die Energieversorgung der heutigen Zellen einen entscheidenden Beitrag (Endosymbiontentheorie) [3]. Eine der Folgen war, dass die Zellen dank einer besseren Energieversorgung größer werden konnten. Wann könnten diese Vorgänge stattgefunden haben und wie wurden sie ausgelöst?

In viel späterer Zeit, als bereits höheres Leben voll entwickelt war, führten Kontinent-Kontinent-Kollisionen zu einem intensiven Faunen- und Florenaustausch, der die jeweils vorher isoliert existierende Lebenswelt zusammenführte. So gab es zum Beispiel den großen amerikanischen Faunentausch vor 2,8 Mio. Jahren, als Nord- und Südamerika bei Panama über eine Landbrücke verbunden wurden. Die Folge war, dass ein einschneidendes Aussterben ganzer Tiergruppen bei gleichzeitigem Aufblühen der konkurrierenden Arten stattfand. Was bedeutete eine Kontinent-Kontinent-Kollision zu einer Zeit, in der es lediglich Einzeller gab, die sich aber isoliert genug auf jedem Kontinent völlig anders entwickelt hatten? Gab es ähnliche Verdrängungseffekte oder war dies vielleicht die Ursache für die Entwicklung der Endosymbionten?

Die Eukaryoten traten vor 1,5 Mrd. Jahren fast spontan auf der Bühne des Lebens auf. Vorfahren, die als Übergangsstadien angesehen werden könnten, sind bisher nicht

eindeutig identifiziert. 500 Mio. Jahre vorher begannen fast alle bestehenden Kleinkontinente aufeinander zuzuwandern, bis sich 300 Mio. Jahre später ein Superkontinent gebildet hatte. Er wird von den Geologen als Columbia bezeichnet [4]. Er bestand weitere 200 bis 300 Mio. Jahre, wobei die letzten 100 Mio. Jahre bereits vom Zerfall und von plattentektonisch bedingten Gebirgsbildungsprozessen geprägt waren. In der Endphase von Columbia traten schließlich die Eukaryoten auf. Bereits 1 Mrd. Jahre vorher hatte die Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre langsam begonnen zuzunehmen, worauf die Lebewelt reagieren musste.

Hierauf lässt sich ein spannendes Szenario aufbauen. Angenommen, auf allen weit auseinander liegenden Kleinkontinenten hatten sich über mehr als 1 Mrd. Jahre endemische Bakterienstämme entwickelt, die ab einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb von Millionen Jahren nach und nach in einem Großkontinent zusammengeführt wurden. Jedes Mal, wenn ein neuer Kleinkontinent an dem großen Komplex anlandete, standen sich „plötzlich“ unterschiedlich stark spezialisierte Bakterienarten gegenüber. Die Anzahl der Individuen und der Zeitraum waren groß genug, dass alle Variationen des Zusammenlebens ausprobiert werden konnten. Es ist nicht ausgeschlossen, dass dieser Prozess zur Entwicklung der Endosymbionten führte, vielleicht durch nachfolgend auftreffende Kleinkontinente sogar mehrfach, wie es bei einigen Organellen der Zellen (Plastiden der Braun-, Gold- und Kieselalgen) heute beobachtet werden kann. Wenn hierzu parallel die Anpassung an die größer werdenden Sauerstoffkonzentrationen in der Atmosphäre und dem Ozeanwasser verlief, könnte vielleicht alles zusammen genommen am Ende von Columbia den Start der Eukaryoten erklären.

An dieses hypothetische Szenario lassen sich gleich einige Fragen anschließen. Gibt es heute in der DNA der

Bakterien und Archaeen noch Relikte, die auf die Zeit der endemischen Entwicklung hinweisen? Lassen sich vielleicht Provinzen auf den Kontinenten finden, die alten Kontinentkernen entsprechen und von derartigen Bakterien dominiert sind; vielleicht in der tiefen Biosphäre?

### 9.3 Und die Viren?

Und noch eine Überlegung muss erlaubt sein. Jedes Lebewesen hat eine ganz speziell auf seine Zellen abgestimmte Virenart, die die Zellen befallen und schädigen können. Nur der ständige Entwicklungswettlauf der Evolution mit ständigen Anpassungen auf beiden Seiten hat dazu geführt, dass beide, der Wirt und die Viren, heute noch nebeneinander existieren. Viren sind Partikel, die allgemein nicht als Lebewesen gelten. Man könnte sie als Teilzeitlebewesen bezeichnen. Sie infizieren Zellen und können sich nur mit deren Hilfe vermehren. Völlig unklar ist, ab wann sie in der Welt der Lebewesen auftauchten und wie sie sich parallel zu den Zellen entwickelt haben. Sind es ehemalige Bakterien, deren Fähigkeit zur Vermehrung verloren ging und die deshalb die Unterstützung anderer Zellen benötigen? Oder sind es RNA- und DNA-Stränge, die aus ihrem Wirt entstanden sind und sich selbstständig gemacht haben? Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass sie sich im Rahmen einer Koevolution aus den ersten RNA-Bausteinen, parallel zu den Zellen, in einer eigenständigen Linie entwickelt haben. Das vorgestellte Modell der Vesikel-Bildung in der kontinentalen Kruste bietet neue Ansätze, um die Virenfrage zu diskutieren. Die parallelen Entwicklungslinien von Vesikeln, Proteinen und RNA in den Kavitäten lassen Raum für die gleichzeitige Entstehung von RNA-Molekülen, jenen, die in den Zellen ihre Fortentwicklung fanden und

denen, die in unmittelbarer Umgebung, aber außerhalb im offenen System der Störungszonen verblieben.

## Literatur

1. Dodd MS, Papineau D, Grenne T et al (2017) Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates. *Nature* 543:60–64
2. Olson JM (2006) Photosynthesis in the Archean era. *Photosynth Res* 88(2):109–117. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9040-5>
3. Martin WF, Garg S, Zimorski V (2015) Endosymbiotic theories for eukaryote origin. *Philos Trans Royal Soc B* 370(1678). <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0330>
4. Rogers JWS, Santosh M (2002) Configuration of Columbia, a mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Res* 5(1):5–22. [https://doi.org/10.1016/s1342-937x\(05\)70883-2](https://doi.org/10.1016/s1342-937x(05)70883-2)



# Willkommen zu den Springer Alerts

Jetzt  
anmelden!

- Unser Neuerscheinungs-Service für Sie:  
aktuell \*\*\* kostenlos \*\*\* passgenau \*\*\* flexibel

Springer veröffentlicht mehr als 5.500 wissenschaftliche Bücher jährlich in gedruckter Form. Mehr als 2.200 englischsprachige Zeitschriften und mehr als 120.000 eBooks und Referenzwerke sind auf unserer Online Plattform SpringerLink verfügbar. Seit seiner Gründung 1842 arbeitet Springer weltweit mit den hervorragendsten und anerkanntesten Wissenschaftlern zusammen, eine Partnerschaft, die auf Offenheit und gegenseitigem Vertrauen beruht.

Die SpringerAlerts sind der beste Weg, um über Neuentwicklungen im eigenen Fachgebiet auf dem Laufenden zu sein. Sie sind der/die Erste, der/die über neu erschienene Bücher informiert ist oder das Inhaltsverzeichnis des neuesten Zeitschriftenheftes erhält. Unser Service ist kostenlos, schnell und vor allem flexibel. Passen Sie die SpringerAlerts genau an Ihre Interessen und Ihren Bedarf an, um nur diejenigen Information zu erhalten, die Sie wirklich benötigen.

Mehr Infos unter: [springer.com/alert](http://springer.com/alert)