

# Erfassung sowie mathematische Korrelierung von Airborne Laser Scanning Daten mit 3 D Terrestrischen Daten als Grundlage für Projektanwendungen

Sven Jany

Milan Flug GmbH, Zum Tower 4, 01917 Kamenz, s.jany@milan-flug.de

Die MILAN-Flug GmbH wurde im Winter 2000 als Tochtergesellschaft von der eta AG engineering, ein Ingenieurbüro in Ostdeutschland mit mehr als 60 Arbeitnehmern, gegründet. Als die Milan-Flug GmbH gegründet wurde, übernahm Milan die Technologie des Luftfahrt-gestützten Laser Scanners und entwickelte sie weiter für übersichtliche Anwendungen.

Seit 2001 hat die Milan-Flug GmbH sein eigenes Laserscanningsystem und Tausende km<sup>2</sup> im Bereich digitaler Geländemodelle gescannt. Die meisten dieser Modelle wurden für Anwendungen erzeugt, deren Daten eine sehr hohe Auflösung und eine hohe Präzision erfordern.

Aufbauend auf der Sachkenntnis, die gewonnen wurde um beim Funktionieren der Kundenorientierten Auswertung der Laser Daten, stellte die Milan-Flug GmbH ein erhöhtes Laserlesegerätsystem mit einem zusätzlichen RGB Sensor dar, der digitale RGB Informationen zu jedem Laser Schuss ermöglicht. Die besitzen vor und Nachbearbeitung Software ist auch abhängig von fortwährender Entwicklung gewesen und angepasst sich den ausgedehnten Fähigkeiten der neuen Sensoren.

Milan-Flug GmbH was founded in winter 2000 as a subsidiary of eta AG, an engineering office in the eastern part of Germany with more than 100 employees. When it was founded, Milan-Flug took over the technology of the aviation-supported laser scanner and developed it further for survey applications.

Since 2001 Milan-Flug has operated its own laserscanning system and has covered thousands of square kilometres in area for digital terrain models. Most of these models were generated for applications requiring data of very high resolution and high precision.

Building on the expertise gained in operating and the customer-oriented evaluation of the laser data, Milan-Flug presented an enhanced laser scanner system with an additional RGB sensor which enables digital RGB informations to each laser shot. The company's own pre- and postprocessing software has also been subject to ongoing development and adapted to the extended capabilities of new sensors.

---

## 1 Einführung

Das Verfahren des Airborne Laser Scannings sowie des 3 D Terrestrischen Laser Scannings hat sich in den letzten 10 Jahren weltweit einen festen Platz bei der Generierung von digitalen Höhenmodellen (DHM) verschafft. Die Datenmodelle bilden sowie sind Basis für Planungsgrundlage im Bergbau, der Wasserwirtschaft, des Straßen- und Städtebaues und vielen anderen Bereichen.

Aufgrund der Hohen Durchdringungsfähigkeit in Vegetationsbereichen mittels des Airborne Laser Scanning Verfahrens ist es möglich zwei separate aber flächenkonforme Digitale Höhenmodelle zu erzeugen:

- das DSM (digital surface model) Oberflächenmodell mit Vegetation und Bebauung

- das DTM (digital terrain model) Bodenmodell ohne Vegetation und Bebauung

Die Laser Scann Systeme sind im Flugzeug bzw. Helikopter fest integriert und es werden heute bis zu 100.000 Lasermesswerte pro Sekunde gesendet sowie empfangen. Aus den Lassermesswerten wird in der Regel ein geometrisches Raster mit variabler Rasterweite (1 m – 100 m) erzeugt.

## 2 Prinzip- und Funktionsweise Airborne Laser Scanning

Digitale Höhenmodelle erzeugt mittels dem Airborne Laser Scanning werden heute mit einer Rasterweite bis zu 1 Meter und besser sowie einer Höhenauflösung von 0,01 Meter erstellt. Die Lagegenauigkeit der Höhenmodelle ist (für jeden Rasterpunkt) besser als  $\pm 0,5$  m und die absolute Höhengenauigkeit (gegenüber dem lo-

kalen Geoid) ist besser als 0,15 m (gültig für 95,7 % bzw.  $2\sigma$  aller Rasterwerte).

Grundlage sind Laserscanner, der bei hohen Messraten (bis zu 100.000 Hz) eine mittlere Messdichte von etwa 4 Messwerten je  $m^2$  erlauben. Die hohe Messdichte stellt sicher, dass auch relativ kleinräumige Strukturen wie Entwässerungsgräben, Dämme oder Bruchstrukturen zuverlässig erkannt werden. Darüber hinaus gewährleistet diese Messdichte die sehr genaue Lokalisierung von Bruchkanten oder Gebäudeumrisse. Das übliche Reihenhaus mit  $80\text{ m}^2$  Grundfläche wird mit etwa 400 Messungen erfasst und im 1-m-Raster mit 80 Höhenwerten beschrieben.

Die Basisverarbeitung der Laserscannerdaten führt zu einem Höhenmodell, das präzis die Geländeoberfläche (Oberkante der Vegetation, Dachhöhen der Häuser etc.) beschreibt; ein derartiges Höhenmodell wird oft auch **DSM, Digital Surface Model** genannt. In einem weiteren Arbeitsschritt können höhere Vegetation und auch Gebäude entfernt werden, so dass ein Höhenmodell der Erdoberfläche (**DTM, Digital Terrain Model**) berechnet wird.

Die hohe Messdichte bzw. die enge Rasterweite der Höhenmodelle gestattet weitergehende Auswertungen wie etwa die Vektorisierung der Gebäude, die Extraktion von Strukturelementen wie Gräben, Bruchkanten oder Dämmen.

## 2.1 Befliegung

Das zuvor bezeichnete Gebiet wird mit einem Laserscanner in einzelnen, parallelen Streifen vollständig beflogen, wobei alle für eine spätere Auswertung notwendigen Daten erfasst werden. Quer zur Flugrichtung überlappen sich diese Streifen. Damit die vorgeplanten Flugstreifen möglichst genau eingehalten werden, wird zur Flugführung eine Navigationseinrichtung mit dGPS Stützung eingesetzt.

Die Messdaten sämtlicher Sensoren (GPS, Inertial Navigation System /INS, Laserscanner, RGB-Scanner) werden synchron aufgezeichnet. Zusätzlich registriert mindestens eine Bodenstation GPS-Daten für die spätere dGPS Berechnung des Flugpfades.

## 2.2 Erfassen der Höhendaten

Heutige Laserscanner führen bis ca. 100.000 Entfernungsmessungen in der Sekunde aus. Bedingt durch den Systemaufbau, ist die Mess-



Abb. 1: Flugzeuggestützte LIDAR inkl. Systemintegration.



Abb. 2: (Innenraum Cessna 207 B, zwei Laserscannensystemen sowie INS).



Abb. 3: Helikoptergestützte LIDAR inkl. Systemintegration.



**Abb. 4: Eurocopter AS 350, Laserscannsystemen sowie RGB-Digital-Framekamera & INS.**

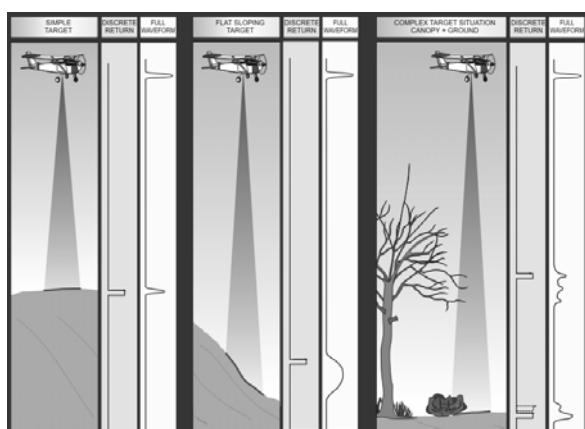
punktdichte konstant und hängt nur von der gewählten Flughöhe ab. Bei einer Flughöhe von 850 m mit einem Flächenflugzeug bei einer Fluggeschwindigkeit von 60....70 m/s ergibt sich eine mittlere Messpunktdichte von etwa fünf Messungen pro m<sup>2</sup>.

### 2.3 Datenverarbeitung

Der erste Verarbeitungsschritt ist die Synchronisation der Laserdaten und der Positionsdaten, die beide mit einer genauen GPS Zeit versehen wurden.

Bei den hohen Messraten der Laserscanner sind benachbarten Zeilen in Flugrichtung nur etwa 0,1 m entfernt. Daher wird hier schon auf eventuelle Fehlmessungen untersucht und die Datenmenge durch Plausibilitätsprüfungen reduziert. Die Art der Datenreduktion (sog. First- oder Last Pulse) orientiert sich an der Anwendung:

Wird ein genaues Bodenmodell DTM gesucht, werden größere Entfernung (niedrigere Bodenhöhe) bevorzugt.



**Abb. 5: Signalauswertung als sog. Full Wave Form Analyse.**

Für ein Oberflächenmodell DSM werden dagegen Messungen mit geringeren Entfernung (größere Höhen) bevorzugt.

Heutzutage ist es nicht nur technisch realisiert den sog First- und Last-Pulse zeit- & echokonform zu erfassen, sondern auch das Einzelsignal als sog. Full Wave Funktion darzustellen (siehe Abb. 5).

Die nachfolgenden Abbildungen 6 und 7 für einen Einzelbaum unter vollen Laubstand soll die Möglichkeiten der Full Wave Form Analyse verdeutlichen (Abgetastete von ca. 50 Lasermesswerten, Flughöhe 800 m ü. Grund). Für spezielle Auswertungen kann die Datenreduktion in diesem Schritt unterdrückt werden. Die Position des reflektierenden Objekts auf der Erdoberfläche wird aus der - nach Datenreduktion und Kalibrierung - berechneter Entfernung sowie der Position und der Orientierung des Sensors berechnet. Hierbei wird zusätzlich in das Zielkoordinatensystem umgerechnet und gleichzeitig die Geoidkorrektur angebracht (z.B. Deutschland nach Denker). Nach diesem Schritt liegen alle Messdaten im endgültig gewünschten Koordinatensystem (z. B. GK, Meridianstreifen 9°, Bessel Ellipsoid, Datum Potsdam, Pegel Amsterdam) vor. Sofern keine allgemeingültigen Transformationsparameter vorliegen oder der Kunde keine geeigneten Transformationsparameter beistellen kann, können lokale Transformationsparameter aus mindestens sieben sowohl in WGS84 als auch im lokalen Koordinatensystem bekannten Punkten ermittelt werden.

Am Ende dieses Arbeitsschrittes liegen die gemessenen Höhen für jeden Flugstreifen in metrischen Zielkoordinaten als Datei vor.

### 2.4 Verknüpfung der Daten

Im nachfolgenden Schritt wird aus den einzelnen Flugstreifen ein flächendeckendes Modell erzeugt. Hierzu werden die Daten des einzelnen Flugstreifens in ein regelmäßiges Raster überführt, das üblicherweise die doppelte Auflösung hat wie das zu liefernde Raster. Bevor die Daten zu einem flächigen Modell zusammengeführt werden, wird geprüft, ob benachbarte Streifen in Lage und Höhe fehlerfrei zueinander passen. Hier ist festzuhalten, dass die Konstellation der GPS Satelliten je nach Befliegungszeitpunkt zu erheblichen Lage- und Höhenfehlern führen kann. Im Gegensatz zu stationären DGPS Berechnungen können bei den hohen Fluggeschwindigkeiten die Mehrdeutigkeiten (Ambiguities) nicht immer ausreichend genau berech-

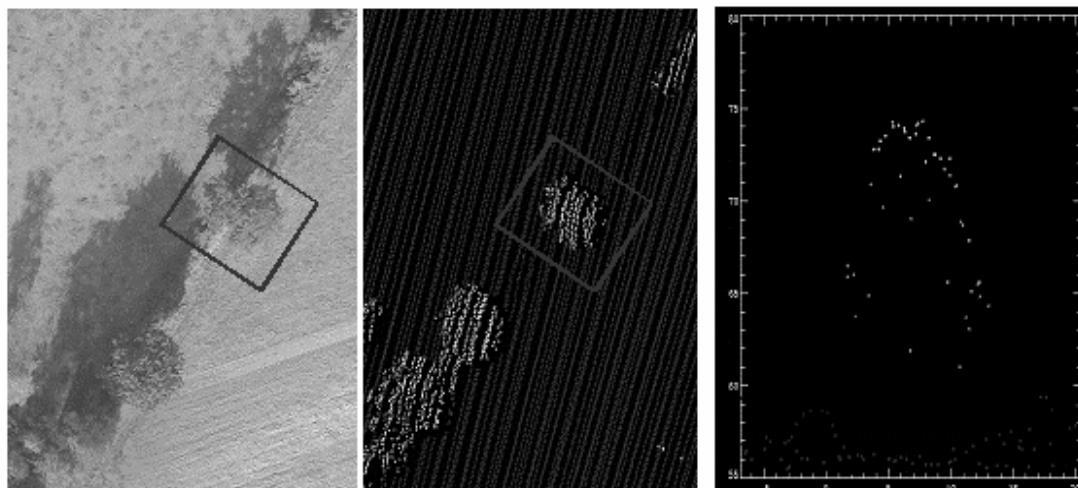
net werden. Daher ist eine Prüfung und eventuelle Anpassung benachbarter Flugstreifen (besonders wenn sie nicht kurz nacheinander beflogen wurden) unvermeidbar.

Zum Schluss wird das Höhenmodell auf die endgültige Rasterweite gebracht. Da hier immer noch wesentlich mehr Messwerte vorliegen, als

benötigt werden, wird nochmals der jeweils plausibelste Wert ausgewählt.

Da in allen Arbeitsschritten wesentlich mehr Messwerte vorliegen als schlussendlich benötigt werden, kann auf eine Interpolation zwischen entfernten Werten verzichtet werden.

**AVIACON**  
Flug GmbH

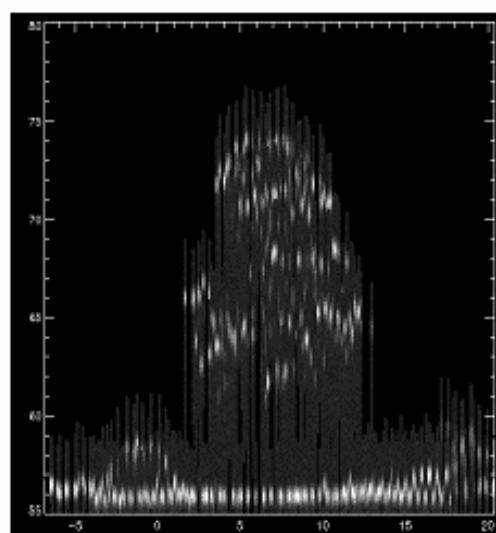


Digital Camera Image

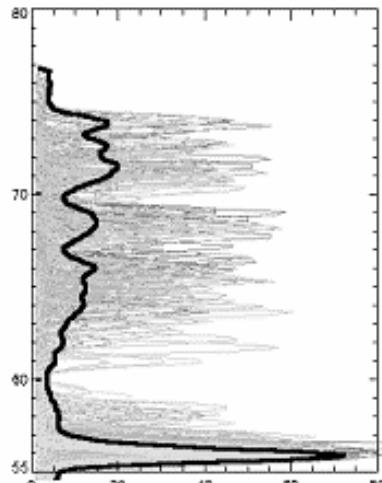
LIDAR Elevation

Discrete Return Profile

**AVIACON**  
Flug GmbH



Return Waveform Profile



Aggregated Waveforms

### Alleinstehender Laubbaum

Abb. 6: Full Wave Form Analyse für alleinstehenden Laubbaum.

## 2.5 Filterung der Daten zu einem DTM (Bodenmodell)

Das Ergebnis der bisherigen Arbeitsschritte ist ein präzises Oberflächenmodell DSM im Zielkoordinatensystem und gewünschten Raster (üblicherweise im 1-m-Raster).

In dichter bewachsenen Bereichen enthält allerdings das DSM noch Restvegetation und Bebauung, die für ein Bodenmodell DTM beseitigt werden müssen. Der nachfolgend beschriebene Arbeitsschritt ist für ein Oberflächenmodell nicht notwendig.

Für die Beseitigung der restlichen Vegetation und Bebauung sind mehrere Verfahren entwickelt worden, die je nach lokalen Gegebenheiten verwendet werden. Generell muss allerdings festgehalten werden, dass niedrige Vegetation (Höhe kleiner 1,5 m) nur sehr schwer automatisch von natürlichen Oberflächeneffekten zu unterscheiden ist. Im allgemeinen können reine Filteralgorithmen ca. 80 % der Vegetation beseitigt werden, der Rest muss interaktiv nachbearbeitet werden.

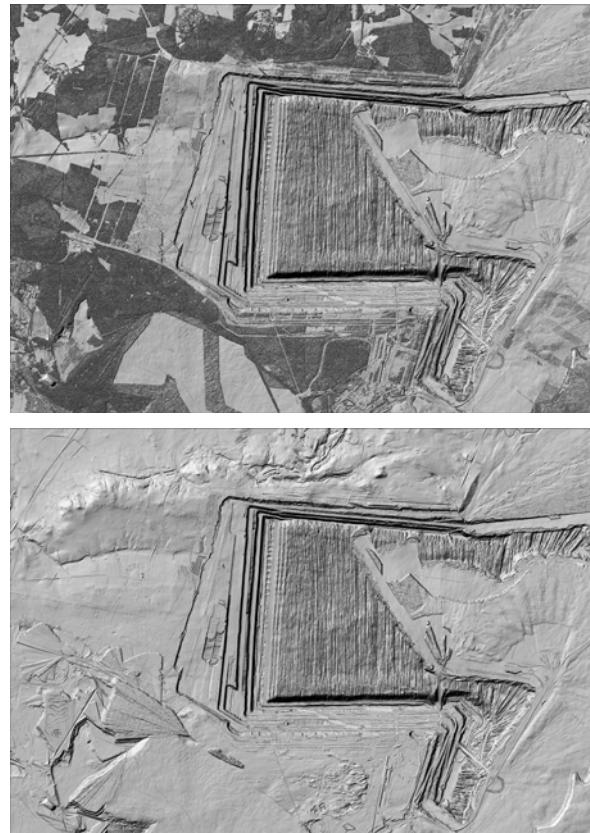
In den bebauten Gebieten (Städte, Gemeinden) erhält man Messpunkte für die DTM-Herstellung überwiegend auf Straßen-, Hof- und Gartenflächen. Beim 1-m-Raster sind in bebauten Gebieten u. a. die Gebäude etc. nicht mit Höhendaten belegt. Von der möglichen Interpolation der nicht belegten Flächen wird abgeraten, da dies leicht zu Fehlinterpretationen des DTM bei der weitergehenden Nutzung führen kann.

Einen kleinen Eindruck von generierten Digitalen Höhenmodellen zur unterstützten Exploration von Braunkohlentiefbaugruben zeigt die folgende Abbildung 7.

## 3 Prinzip- und Funktionsweise 3D Terrestrisches Laserscanning

In gleicher Art und Weise wie mittels luftgestützten Airborne Laser Scanning kommt das Scannprinzip beim Terrestrischen Laser Scanning zur Anwendung. Zum Einsatz kommt ein rotierender Vier Facetten Scanner mit einer Reichweite > 800 m und einer Scannrate von 15.000 Lasermesswerten pro Sekunde. Bei dem berührungslosen Messverfahren wird konform eine hochauflösende Digitalkamera orientiert und kalibriert mitgeführt. So entsteht eine 6 Spalten ASCII-Datei, X, Y, Z, R, G, B (Hochwert, Rechtswert, Höhe & die digitalen Farbinformati-

onen Red, Green, Blue). Die geodätische Orientierung der Einzelstandpunkte erfolgt über die mathematische Vielfacherfassung von Reflektormessmarken. Scannparameter und Scannprinzip sowie Scansystem sind in der folgenden Tabelle 1 sowie in Abbildung 8 dargestellt.



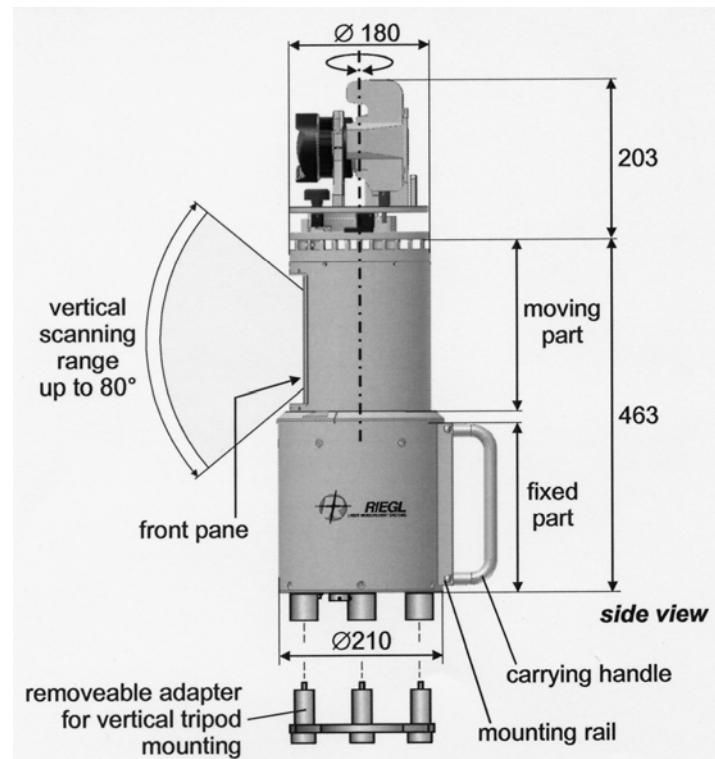
**Abb. 7: Braunkohlentagebau Welzow-Süd Land Brandenburg, Vattenfall Europe Mining & Generation AG, 10 km \* 7 km, 70 Mio. Rasterpunkte, ca. 200 Mio. Lasermesspunkte, visualisiert als sog. Shaded Relief**

oben: Oberflächenmodell mit Vegetation und Bebauung,

unten: Bodenmodell ohne Vegetation und Bebauung.

**Tab. 1: 3D Terrestrischer Laserscanner (LMS-Z420i).**

Eigenschaften des 3D Laserscanners		Eigenschaften der Digitalkamera	
Modellbezeichnung	RIEGL LMS-Z420i	Modellbezeichnung	Nikon D 70, D100 bzw. D 200
Reichweite	bis 800 m @ Laser Klasse I	Anzahl Pixel	3.008 x 2.000 bis 4.600 * 4.600 (6 Mio. Pixel bis 10 Mio. Pixel)
Scannbereich horizontal	360°	Anzahl Fotos pro Standpunkt	7
Schrittweite horizontal	min. 0.008°		
Scannbereich vertikal	80°		
Schrittweite vertikal	min. 0.010°		
Streckenmessgenauigkeit	± 10 mm (Einzelmessung)		
Datenrate	bis 12.000 Punkte/Sekunde		
Punktanzahl pro Standpunkt	ca. 2 Mio.		

**Abb. 8: 3D Terrestrischer Laserscanner LMS-Z420i, RIEGL Laser Measurement Systems, und schematisch das Scannprinzip**

## 4 Projektanwendung

Ein Beispiel der Verknüpfung von luftgestützter Datensätze mittels des Airborne Laser Scanning sowie landseitiger Messaufnahme mittels dem Terrestrischen Laserscanning stellt die komplimentäre dreidimensionale digitale Erfassung der Frauenkirche dar.



Abb. 9: Frauenkirche Dresden.

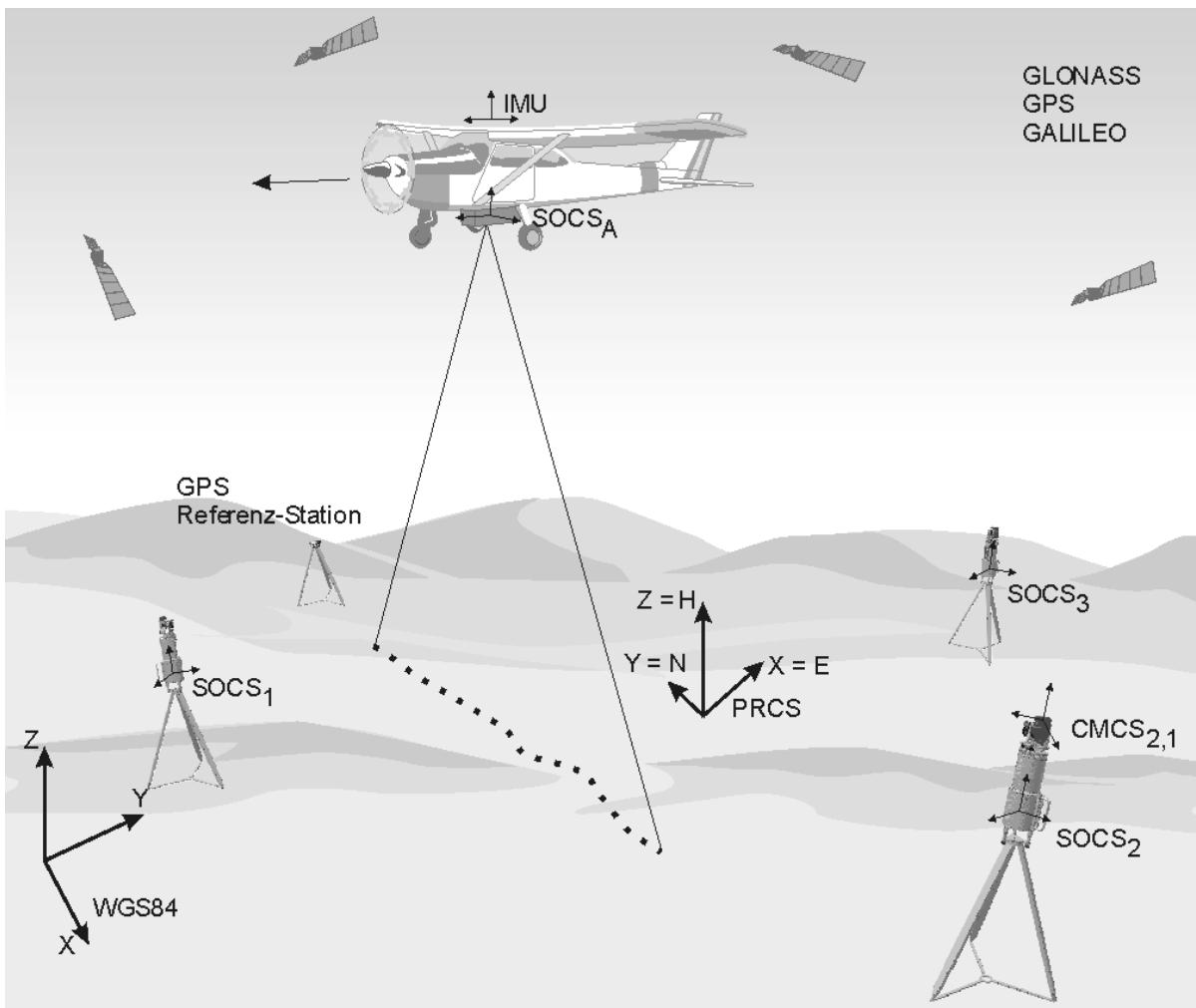


Abb. 10: Geodätische Orientierung luft- & landgestützter Laser Messaufnahme.

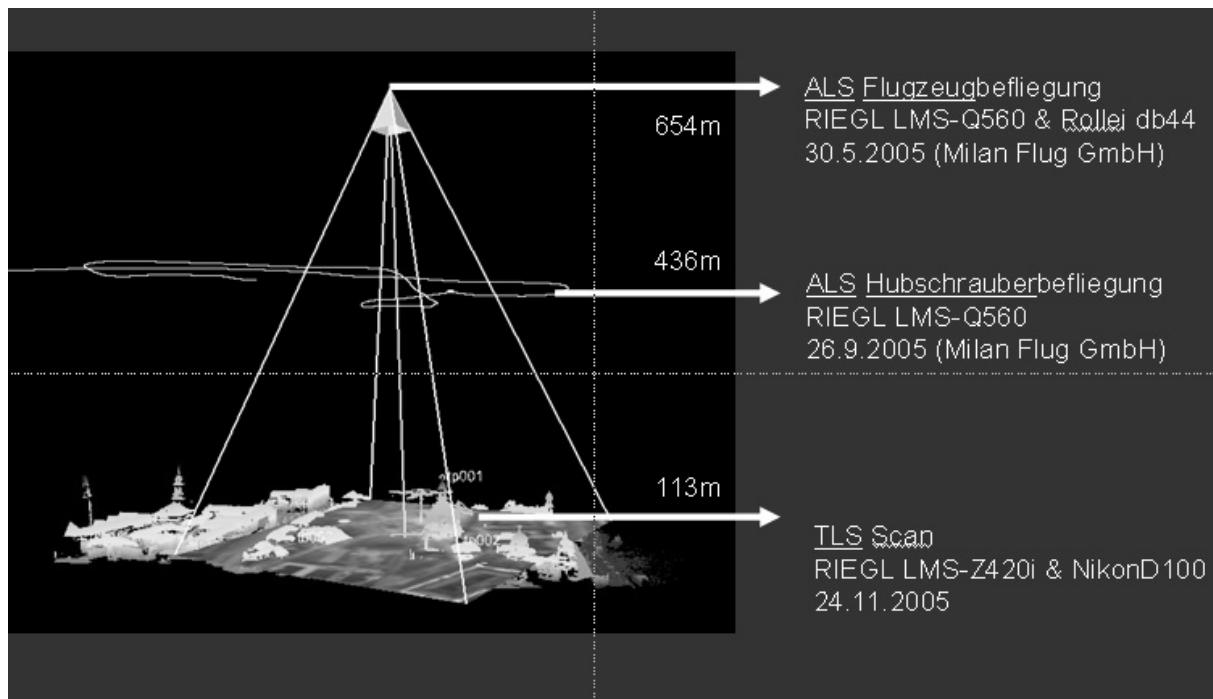


Abb. 11: Kombinierte 3D Laser Erfassung mittels ALS (Airborne Laser Scanning) & TLS (Terrestriisches Laser Scanning).

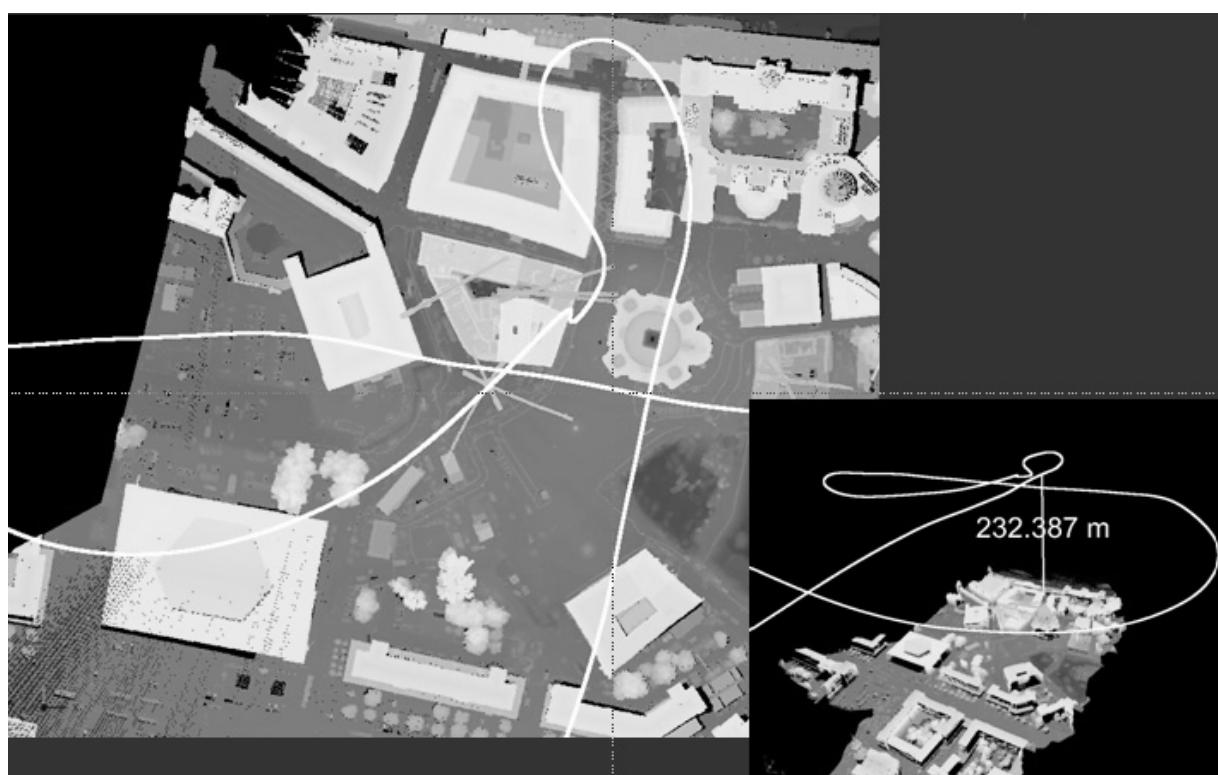


Abb. 12: 3D Pseudocolor aus Laserdatensatz.



Abb. 13: **3D Terrestrisches Laserscanning.**

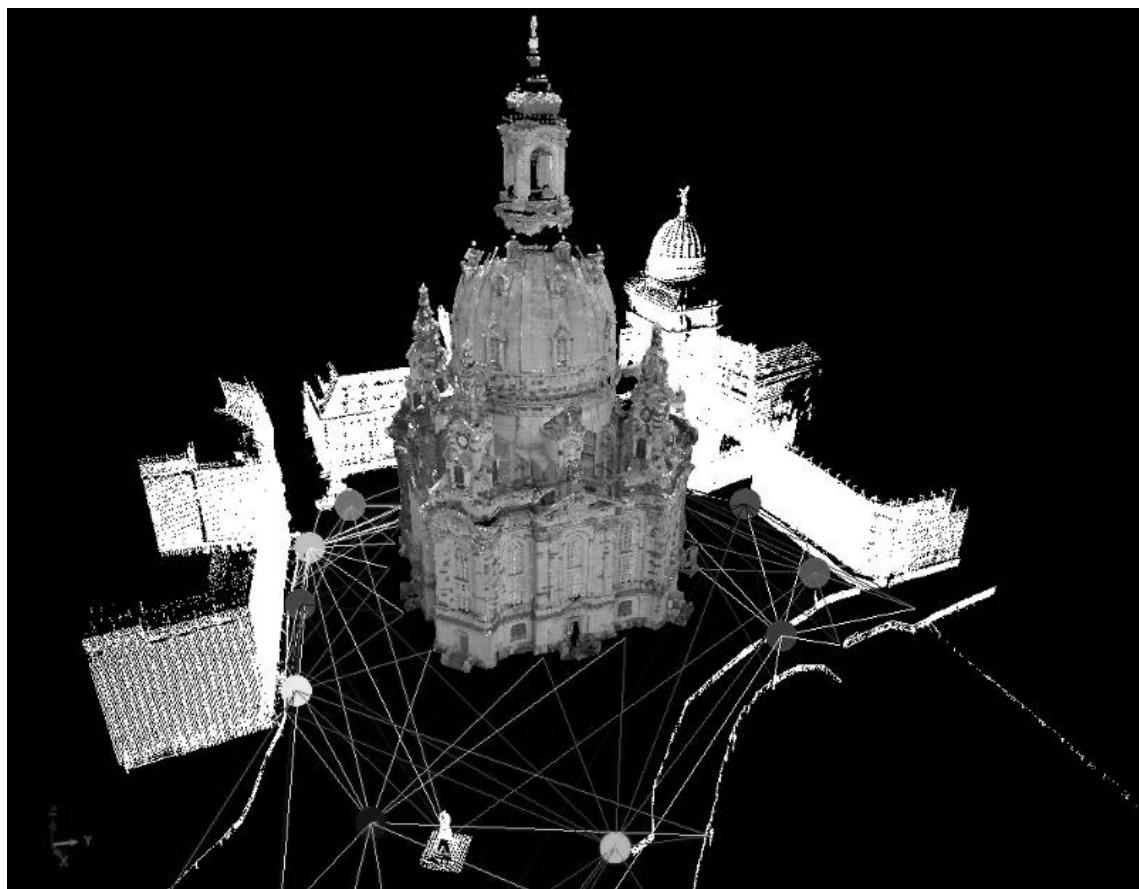


Abb. 14: **3D terrestrische Erfassung und Triangulierung der Laser Standpunkte.**



Abb. 15: 3D terrestrische Laser Erfassung und RGB-Bilddatentexturierung.



Abb. 16: 3D CAD Komplexmodell mittels ALS & TLS Daten.