

# Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

Jahrgang 2004  
Heft 3

Organ der Deutschen  
Gesellschaft für  
Photogrammetrie,  
Fernerkundung  
und Geoinformation  
(DGPF) e.V.



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung  
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart

## Airborne Laser-Scanning, ein Vergleich mit terrestrischer Vermessung und Photogrammetrie

ROLF KATZENBEISSER & SVEN KURZ, Biberach

**Keywords:** airborne laser-scanning, LIDAR, tachymetry, photogrammetry, point accuracy, object accuracy, scan pattern, multiple echo

**Zusammenfassung:** Die Erfassung von topographischen Daten kann mit terrestrischer Vermessung (Tachymetrie), Photogrammetrie oder Laser-Scanning erfolgen. In diesem Beitrag werden die konventionellen Verfahren kurz skizziert und das Messverfahren des Airborne Laser-Scanning erläutert. Dabei wird auf die flächendeckende Erfassung der Topographie abgehoben und nicht auf die Vermessung herausragender Punkte oder Strukturen. Zum Schluss wird ein Vergleich der drei Verfahren mit ausgewählten Vor- und Nachteilen aufgeführt.

**Summary:** *Airborne Laser-scanning – a comparison with terrestrial surveying and photogrammetry.* The acquisition of topographical data can be done by terrestrial surveying (tachymetry), photogrammetry or airborne laser-scanning. This paper outlines the two conventional methods and describes the measurement scheme of laser-scanning. Importance is attached to a complete coverage of the topography instead of pinpointing prominent elements or structures.

A comparison of the three methods outlining their advantages and disadvantages for specific applications completes the paper.

### 1 Einleitung

In den letzten Jahren wird Laser-Scanning immer häufiger für die Erfassung digitaler Geländemodelle eingesetzt. Dennoch entsteht immer wieder der Eindruck, dass die Besonderheiten dieses Messverfahrens nicht bekannt oder zumindest nicht bewusst sind.

Missverständnisse entstehen immer wieder bei den Begriffen wie Genauigkeit, DGM, DSM, DOM. Gesucht wird ein Höhenmodell, das die gesamte Topographie möglichst präzise repräsentiert, gefordert wird allerdings oft die Genauigkeit von Einzelpunkten.

Im Folgenden wird daher versucht, die Eigenschaften unterschiedlicher Verfahren darzustellen und diesen die Leistungsfähigkeit des Laser-Scanning gegenüber zu stellen. Die konventionellen Verfahren werden nur skizziert, da sie als bekannt vorausgesetzt werden können.

### 2 Terrestrische Vermessung

Die terrestrische Vermessung kann im Gegensatz zum Laser-Scanning Verfahren einzelne Punkte mit einer sehr hohen Genauigkeit bestimmen (mm-Genauigkeiten möglich). Unterstützt wird dies bei modernen elektronischen Vermessungsinstrumenten dadurch, dass mehrere Messungen zu einer Messung mit einem sehr großen Vertrauensbereich zusammengefasst werden.

In der Regel werden bei solchen punktuellen Messverfahren die Punkte aufgenommen, die vom Vermesser individuell als wesentlich erachtet werden. In der Regel werden dabei signifikante Einzelpunkte oder Kanten erfasst (KAHMEN 1993). Im Wesentlichen werden dabei Bodenpunkte erfasst, Bäume werden zum Teil nur durch eine punktuelle Messung bestimmt (eventuell mit einem Attribut: Baumkronendurchmesser).

Die einzelnen Messungen sind im Allgemeinen auch jederzeit reproduzierbar und somit auch später noch kontrollierbar. Die mit einem solchen Verfahren hochgenau bestimmten Punkte lassen aber zum Teil nur sehr eingeschränkt eine flächenhafte Aussage über die nicht erfassten Bereiche zwischen den Punkten zu, die der Genauigkeit der aufgenommenen Einzelpunkte entspricht. Da aber schon bei der Aufnahme auf topographisch relevante Punkte Rücksicht genommen wird, lassen sich in der Regel Zwischenpunkte in erster Näherung linear interpolieren.

Eine größere, dichte und flächenhafte Punkterfassung (mehrere ha) ist damit aber aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll. Im Katasterbereich wird die terrestrische Vermessung weiterhin ihren Stellenwert beibehalten, da hier das Verfahren des Laser-Scanning nicht geeignet ist. Die hoch genaue Erfassung von Gebäuden mittels Laser-Scanning könnte in diesem Bereich nur eine unterstützende Rolle übernehmen.

### 3 Photogrammetrie

Die Photogrammetrie eignet sich im Vergleich zur terrestrischen Vermessung besser, wenn es darum geht, flächenhaft topographische Punkte zeitlich effizient und wirtschaftlich zu erfassen.

Bei der photogrammetrischen Vermessung ist die Genauigkeit in erster Linie von der Flughöhe und von der Brennweite der Kamera abhängig (KRAUS 1994, KKVA 2000). Eine Verwendung von kleineren Brennweiten verbessert die erreichbare Höhengengenauigkeit. Während der digitalen Auswertung spielt die Auflösung, mit der das Luftbild gescannt wird, eine wichtige Rolle (digitale Kameras: Auflösung bei der Aufnahme).

Für den Normalfall der photogrammetrischen Zweibildauswertung gilt für die erreichbare Höhengengenauigkeit (KRAUS 1994):

$$\sigma_z = m_b^* Z/B * \sigma_{pe}$$

$m_b$  Bildmaßstabszahl

$Z$  Flughöhe über Grund

$B$  Aufnahmebasis

$\sigma_{pe}$  Parallaxenmessengenauigkeit

Bei allen Betrachtungen ist es wichtig, dass man bei der photogrammetrischen Punktbestimmung zwischen signalisierten Punkten und „natürlichen Geländepunkten“ unterscheidet. Üblich erreichbare Genauigkeiten für signalisierte Punkte bei einer Bündelblockausgleichung sind (KRAUS 1994):

$$\text{Lage: } \sigma_{xy(\text{sig})} = \pm m_b * 3 \mu\text{m}$$

$$\text{Höhe: } \sigma_{z(\text{sig})} = \pm m_b * (0.03\% - 0.04\%) * c$$

$c$ : Kammerkonstante

Bei einem Bildmaßstab von 1:5000 und einer Kammerkonstanten von 15,3 cm kann man zu folgenden Werten gelangen:

$$\sigma_{xy(\text{sig})} \approx \pm 1,5 \text{ cm}$$

$$\sigma_{z(\text{sig})} \approx \pm 3 \text{ cm}$$

Bei natürlichen Geländepunkten kommt zusätzlich eine Definitionsunsicherheit hinzu.

$$\text{Lage: } \sigma_{xy(\text{max})} = \sqrt{\sigma_{xy(\text{sig})}^2 + \sigma_{xy(\text{def})}^2}$$

$$\text{Höhe: } \sigma_{z(\text{max})} = \sqrt{\sigma_{z(\text{sig})}^2 + \sigma_{z(\text{def})}^2}$$

Näherungswerte für die Definitionsunsicherheit bei natürlichen Geländepunkten kann man (KRAUS 1994) entnehmen:

	Lage[cm] $\sigma_{xy(\text{def})}$	Höhe [cm] $\sigma_{z(\text{def})}$
Haus- und Zaunecken	7– 12	8– 15
Kanaldeckel	4– 6	1– 3
Feldecken	20–100	10– 20
Sträucher, Bäume	20–100	20–100

Es lassen sich auch bei diesem Verfahren sehr gute Genauigkeiten erzielen, wenn man entsprechend gute kontrastreiche Strukturen der Topographie in den Luftbildern als Voraussetzung annimmt.

Die obigen Angaben beziehen sich aber immer auf Eckpunkte, die einen entsprechenden Kontrast zum Umfeld voraussetzen (texturiertes Gelände). Diese Bedingung ist aber bei einer homogenen dichten und flächenhaften (rasterförmigen) Geländeerfassung nicht überall gegeben und somit nicht immer einzuhalten. Die photogrammetrische Auswertung basiert auf einem

passiven Messverfahren, d. h. Messungen in schattigen Bereichen stehen im direkten Zusammenhang mit ihrer erreichbaren Genauigkeit.

Je nach Messpunktdichte bei der Auswertung lassen sich auch genauere flächenhafte Aussagen über das Gelände ableiten. Eine homogene Flächenabdeckung erreicht man zum Beispiel mit der Software SCOP. Diese Software interpoliert zwischen gemessenen Punkten, um einen homogenen Übergang zwischen den einzelnen Flächenelementen zu schaffen – Ausnahme bilden Bruchkanten, wenn diese als solche deklariert wurden.

Ein automatisches Verfahren zur photogrammetrischen Massenpunkterfassung ist zum Beispiel der Ansatz einer automatischen Flächenkorrelation in digitalen Bildern. Dabei wird der Ansatz der kleinsten Quadrate zugrunde gelegt (LSM – Least Squares Matching). Dieses Verfahren eignet sich aber nur in gut texturiertem und offenem Gelände, ohne Wald und Gebäude (KRAUS 2000).

Wie bereits erwähnt, sind die bei diesem Verfahren erreichbaren Genauigkeiten sehr stark abhängig von der Struktur und dem Kontrast der Oberfläche in den Luftbildern. Selten gelten für alle Messungen innerhalb eines Bereiches die Genauigkeiten des „Best Case“, der unter Umständen für eine Auswertung angegeben wird. Die Ergebnisse eines solchen „Best Case“ dürfen nicht für eine Genauigkeitsangabe bei einer abgeleiteten flächenhaften Aussage für das gesamte Modell zugrunde gelegt werden. Schwierig oder teilweise sogar unmöglich wird es, in Bereichen von Watt, Sandstränden oder Wiesen eine hohe und gleich bleibend konstante Genauigkeit für jede einzelne Messung zu garantieren.

## 4 Laser-Scanning

### 4.1 Prinzip

Von einem Sensor im Flugzeug wird mit einem gepulsten Laser die Entfernung zum Boden, oder besser zu einem reflektierenden Objekt, bestimmt (Abb. 1). Sind Strahlrichtung und Position des Sensors bekannt,

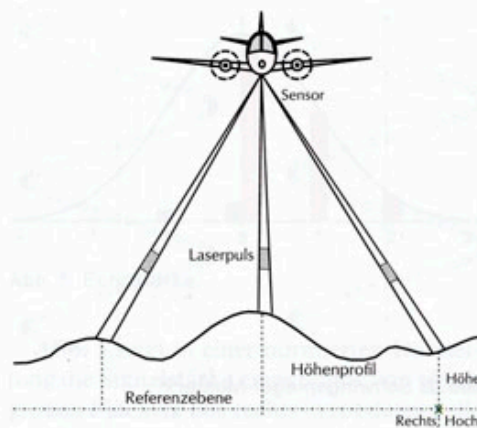


Abb. 1: Messprinzip.

können die Koordinaten des reflektierenden Objekts berechnet werden.

Die Strahlrichtung wird durch eine entsprechende Einrichtung von Puls zu Puls geändert und von der Bewegung des Flugzeugs beeinflusst. Durch die seitliche Ablenkung des Laserstrahls und die Bewegung des Flugzeugs wird ein Geländestreifen unterhalb des Flugzeugs erfasst. Mit einer Reihe benachbarter Streifen werden große Gebiete flächendeckend vermessen.

Die augenblickliche Position des Sensors ist vorwiegend durch die kontinuierliche Vorwärtsbewegung des Flugzeugs bestimmt, aber auch von Böen und Thermik oder „Luftlöchern“ beeinflusst. In diesem Artikel soll auf die Messfehler bei Entfernung, Position und Richtung nicht weiter eingegangen werden. Zum einen können diese Fehler durch geeignete Befliegungsparameter (sehr gute GPS) und adäquate Sensorkonstruktion kompensiert werden, und zum anderen sind ihre Ursachen und Auswirkungen in einer Reihe von Veröffentlichungen dargestellt (SCHENK 2001a, SCHENK 2001b, KATZENBEISSER 2003a).

### 4.2 Flächendeckung

In einem Flugstreifen wird die gesamte Fläche erfasst. Die Verteilung der Messpunkte und deren Abstand hängen wesentlich vom verwendeten Scanner-System, der Flughöhe und dem Scanwinkel ab. Generell muss zwi-

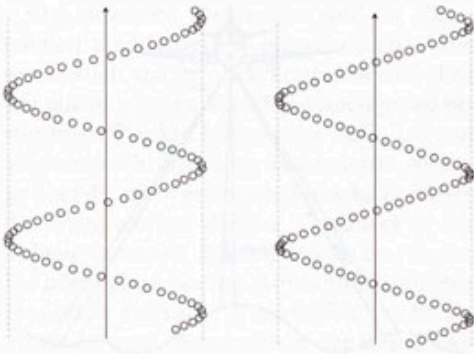


Abb. 2: Schwingenspiegel-Muster.

schen vier verschiedenen Scanmustern unterschieden werden (Abb. 2 und 3).

Bei einem Schwingenspiegel wird der Strahl zwischen zwei extremen Positionen abgelenkt. Je nach Art der Ansteuerung entsteht dabei ein Sinus oder ein Sägezahn. Beim Sinus ist der Punktabstand entlang der Scanlinie in der Mitte sehr groß und am Rand sehr klein. Daten aus dem Randbereich sind wegen Winkelfehlern nicht brauchbar. Beim Sägezahn ist der Punktabstand entlang der Scanlinie weitgehend konstant, nur im äußersten Randbereich treten engere Abstände auf. Der Abstand entlang der Flugrichtung hängt von der Scan-Frequenz und der Fluggeschwindigkeit ab und kann in weiten Grenzen verändert werden.

Von einem rotierenden Polygonspiegel wird der Laserstrahl linear von einer Seite des Streifens zur anderen Seite abgelenkt. An den Ecken des Polygons können keine Messwerte erfasst werden. Die Größe dieser Bereiche variiert mit der Detail-Konstruktion.

Beim Faserscanner wird der Laserstrahl durch die Orientierung der einzelnen Faser

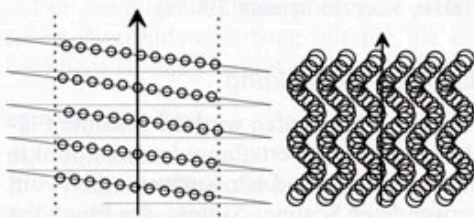


Abb. 3: Polygon- und Faserscanner.

ausgerichtet. Der Messabstand ist entsprechend der Faseranordnung konstant. Die Laserpulsrate wird vollständig zur Messung verwendet. Abb. 3 zeigt rechts das resultierende Scanmuster überlagert mit einer sehr leichten Schwingung, zur Füllung der sonst zwischen den Fasern entstehenden Messlücken.

### 4.3 Zuverlässigkeit

Bei der Entfernungsmessung mit einem EDM stellt man üblicherweise die Forderung einer Mehrfachmessung. Dabei orientiert sich die Messdauer oder die Anzahl der Messungen an der „Qualität“ des Reflektors. Je weniger bekannt das reflektierende Objekt ist (Reflektor, Hauswand, Baumstamm, etc.), umso länger muss die Messdauer sein.

Aus der kontinuierlichen Bewegung des Flugzeugs und der sich ändernden Strahlableitung folgt, dass jede Entfernungsmessung einmalig ist. Sie kann nicht durch Mehrfachmessungen verifiziert oder verbessert werden. Die Zuverlässigkeit einer einzelnen Messung mit einem scannenden Laser liegt also erheblich unter der einer Messung mit einem EDM. Die Zuverlässigkeit eines Höhenmodells muss daher mit anderen Mitteln erreicht werden. Wie beim EDM muss ein Ensemble gefunden werden, das zuverlässige Aussagen zulässt. Dies kann durch sehr dichte Messungen erfolgen, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass sich im direkten Umfeld kaum Höhenänderungen ergeben haben. Die Wahl des Ensembles muss dynamisch erfolgen und sich an die jeweiligen Gegebenheiten anpassen.

Eine andere Möglichkeit wird von TopoSys genutzt. In Flugrichtung überlappen die vom Laserstrahl ausgeleuchteten Flächen wegen der hohen Scan-Rate sehr stark (Abb. 3). Selbst bei dynamischem Gelände können zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen keine wesentlich anderen Ergebnisse auftreten, sofern keine abrupten Höhenänderungen (Strasse – Dachkante) vorliegen. Mit einer geeigneten Plausibilitätsprüfung benachbarter Messungen

wird daher eine höhere Zuverlässigkeit der Messungen erreicht.

#### 4.4 Genauigkeit

Häufig wird eine Angabe zur Lagegenauigkeit für Einzelmessungen gefordert. Gemeint wird damit meist die Genauigkeit der Lage- und Richtungsbestimmung des Sensors. Dabei wird übersehen, dass ein Laserstrahl nicht unendlich dünn ist und dass er sich mit der Entfernung aufweitet (Strahldivergenz).

Allgemein wird angenommen, dass die Energieverteilung im Laserstrahl einer Gaußverteilung folgt (Abb. 4, schematisch, normiert). Für den Strahldurchmesser sind zwei Angaben üblich. In der Optik wird mit  $\varphi = 1/e^2$  gearbeitet, während der ISO-Standard zur Lasersicherheit von  $\varphi = 1/e$  ausgeht. Der Radius wird damit zu bzw.  $r = \sqrt{2}\sigma$ .

Die Lage eines reflektierenden Objekts wird immer der Strahlmitte zugeordnet. Ein Objekt im Laserstrahl reflektiert soviel Energie, wie seiner Lage im Strahl entspricht. Ein Objekt mit hoher Reflektivität kann also auch außerhalb des nominellen Strahldurchmessers ein Echo liefern, während ein Objekt mit niedriger Reflektivität nur im Innenbereich detektiert werden kann. Daraus folgt, dass die Lage von Objekten mit niedriger Reflektivität genauer erfasst wird als von solchen mit hoher Reflektivität.

Allerdings bewirkt eine niedrige Reflektivität auch eine geringere Signalstärke des Echos, mit der Folge, dass bei vielen Sensoren die Messgenauigkeit abnimmt oder das Messrauschen erheblich ansteigt (KATZENBEISSER 2003b).

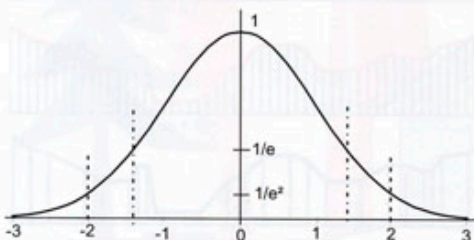


Abb. 4: Strahldurchmesser.

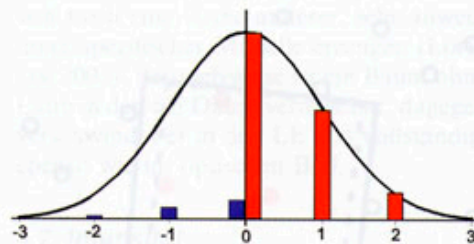


Abb. 5: Echostärke.

Abb. 5 zeigt in einer normierten Darstellung die Signalstärke eines Echos von gleich großen Flächen. Die rechts in rot dargestellten Echos werden mit der Entfernung von der Strahlmitte schwächer. Gleiches gilt für die links in blau dargestellten Echos, bei denen die reflektierenden Flächen aber nur  $1/10$  der Reflektivität der roten Flächen haben.

#### 4.5 Objektgenauigkeit

Wie gut oder genau beschreiben die Vielzahl der Einzelmessungen ein Gelände oder Objekte? Die Einzelmessungen sind mehr oder weniger zufällig über einen Streifen verteilt. In einem homogenen Gelände spielt der Messabstand oder die Verteilung der Messungen eine untergeordnete Rolle. Sollen aber Objekte wie Gräben, Dämme, Dachkanten erfasst werden, dann müssen an Verteilung und Messabstand entsprechende Forderungen gestellt werden.

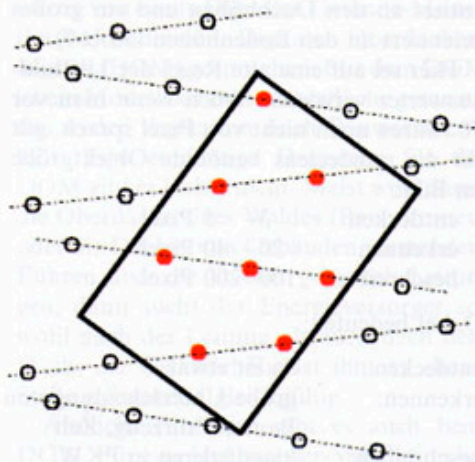


Abb. 6: Messpunktverteilung über Gebäude.

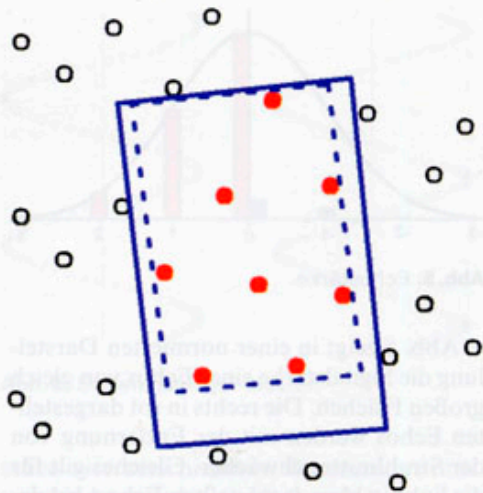


Abb. 7: Vermutetes Gebäude.

Abb. 6 zeigt ein Gebäude und die darüber zufällig verteilten Messwerte, wie sie bei der häufig geforderten Messdichte von 1 Punkt je  $4 \text{ m}^2$  zu erwarten sind. Die offenen Kreise stellen Bodenhöhen und die roten Kreise Dachhöhen dar. Auf der Basis dieser acht höher liegenden Messwerte kann man viel interpretieren. Eine Möglichkeit zeigt Abb. 7.

Wenn man unterstellt, dass die Grundform ein Rechteck sein muss, können Gebäude in fast beliebiger Orientierung eingefügt werden. Hier sind zwei Möglichkeiten von Rechtecken dargestellt; ein kleines orientiert an den Dachhöhen und ein großes orientiert an den Bodenhöhen (Abb. 7).

Hier sei auf eine alte Regel der Luftbildauswerter verwiesen. Auch wenn man vor 70 Jahren noch nicht von Pixel sprach, gilt für die mindestens benötigte Objektgröße im Bild:

- entdecken 3– 5 Pixel
- erkennen 20– 40 Pixel
- beschreiben 100–200 Pixel.

Dabei bedeuten:

- entdecken: da ist etwas
- erkennen: grobe Unterscheidung von Baum, Fahrzeug, Zelt
- beschreiben: klassifizieren in PKW, LKW etc.

Ein ähnliches Problem liegt auch für Geländestructuren vor. Abb. 8 zeigt das prinzipielle Problem vereinfacht in einer nur zweidimensionalen Betrachtung.

Die schwarze Linie zeigt ein 25,0 m langes Geländeprofil mit einem 2,5 m breiten Damm, einem Bachlauf und einer Stützmauer. Tastet man das Profil mit einer Schrittweite von 2,0 m ab, entsteht das lila Profil, bei 1,0 m Weite das blaue und bei 0,5 m Weite das rote Profil. Das lila Profil lässt weder den Damm noch die Stützmauer erkennen. Im blauen Profil ist zumindest der Damm erkennbar, für die Stützmauer braucht man schon Ortskenntnisse. Dagegen gibt das rote Profil das Gelände mit allen Objekten sehr gut wieder. Dünnt man das rote Profil aus, dann erhält man das grüne Profil mit wesentlich weniger Punkten, das aber das Gelände besser beschreibt.

Auch hier gilt eine sehr alte Regel: Wird ein Signal mit äquidistanten Schritten abgetastet, dann darf die Schrittweite höchstens halb so groß sein, wie die kleinste Form, die man noch erkennen will. In der Elektrotechnik ist diese Forderung als Shannon-Theorem bekannt und wird seit mehr als 50 Jahren benutzt. Im Beispiel der Abb. 8 bedeutet das folgendes: Will man die 1,0 m breite Stützmauer erkennen, dann darf die Abtastweite nicht größer sein als 0,5 m. Was hier verein-

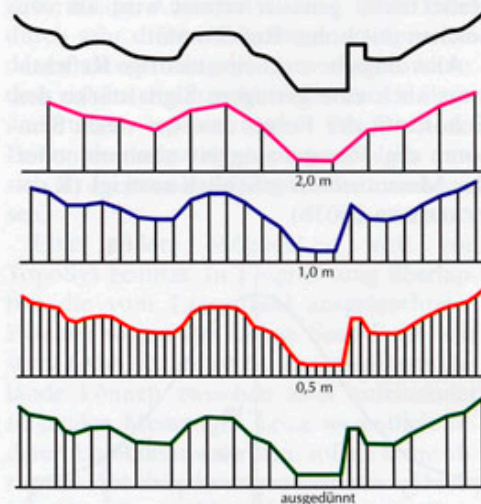


Abb. 8: Profile und Messweite.

facht dargelegt wurde, gilt im Dreidimensionalen äquivalent. Wird der Messabstand zu groß, dann gehen detaillierte Strukturen verloren.

#### 4.6 Mehrfach-Echos

Jede reflektierende Oberfläche, die vom Laser getroffen wird, reflektiert einen Teil und verursacht damit ein vielleicht detektierbares Echo.

Abb. 9 zeigt das generelle Prinzip für eine Lasermessung. Beim Haus entstehen zwei Echos, eines vom Dach und ein zweites vom benachbarten Boden. Bei der Fichte sind 4 Echos von den Ästen und ein Echo vom Boden dargestellt.

In der Praxis sind die fünf Echos bei der Fichte meist nicht vorhanden. Damit man getrennte Echos detektieren kann, müssen reflektierende Flächen einen Mindestabstand haben, der vom jeweils benutzten Sensor abhängt und gegenwärtig zwischen 0,8 m und 6,0 m liegt. Ist der untere Ast nur 2,5 m über dem Boden, dann stammt das letzte Echo bei fast allen Sensoren vom Ast und nicht vom Boden. Beim TopoSys Sensor beträgt der Mindestabstand knapp 1,0 m. In den weit überwiegenden Fällen ist es ausreichend, das erste und das letzte Echo zu vermessen und auszuwerten (KATZENBEISSER 2003-2).

Vielfach werden hier die englischen Begriffe First Echo (FE) und Last Echo (LE) verwendet. Aus FE Daten wird überwiegend ein Oberflächenmodell erzeugt, während die LE Daten die Basis für ein Bodenmodell liefern. Neben diesen beiden Modellen lässt

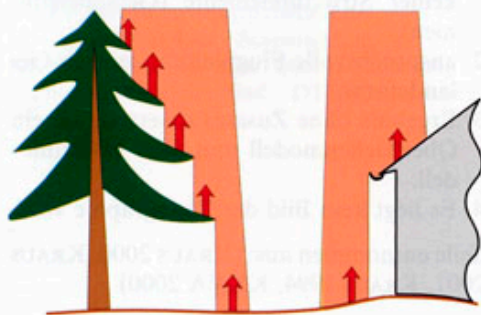


Abb. 9: Mehrfach-Echos.

sich noch eine Reihe anderer, sehr anwendungsspezifischer Modelle erzeugen (LÖFFLER 2003). Beispielsweise ist ein Baum ohne Laub in den FE Daten vermessbar, dagegen verschwindet er in den LE fast vollständig, ebenso wie im optischen Bild.

#### 4.7 Intensität

In den vergangenen zwei Jahren wird der Wunsch nach Intensitätsbildern immer häufiger geäußert. Dahinter besteht die Vorstellung, dass man aus der Stärke des Echosignals weitere Informationen ableiten kann.

In der Fernerkundung mit passiven Sensoren werden aus der Intensität einer abgebildeten Fläche in mehreren Spektralbereichen Rückschlüsse auf die Eigenschaft oder Klassenzugehörigkeit dieser Fläche gezogen.

Eine Übertragung dieser Verfahrensweise auf das Laser-Scanning ist nur sehr eingeschränkt zulässig, da die Fläche vom Laser beleuchtet wird und die Größe der ausgeleuchteten Fläche nur selten bekannt ist (KATZENBEISSER 2003c).

Der Wert der Intensität ist nur dann einigermaßen aussagekräftig, wenn über offenen flachen Flächen nur ein Echo detektiert wurde.

#### 4.8 Anwendungen

Bei digitalen Höhenmodellen wird gegenwärtig von einem Digitalen Gelände-Modell (DGM) und einem Digitalen Oberflächen-Modell (DOM) gesprochen. Mit dem DGM ist ein Modell der Bodenoberfläche gemeint, das weder Vegetation noch Bauwerke enthält. Eine eindeutige Definition für das DOM gibt es bisher nicht. Meist wird damit die Oberfläche eines Waldes (Baumkronen) oder die Dächer von Gebäuden verstanden. Führen über die Dächer gar noch Leitungen, dann sucht der Energieversorger sowohl nach der Leitung als auch nach dem Dach, die Geländehöhe ist ihm an dieser Stelle weitgehend gleichgültig.

Ähnliche Probleme gibt es auch beim DGM. Für eine Hochwasser-Simulation benötigt der Hydrauliker alle potenziellen



Hindernisse, sucht also nach allen erhöhten Objekten, während ihn kleinere Entwässerungsgräben nicht interessieren. Für eine Grundwassersimulation sucht der Hydrauliker dagegen nach allen Gräben, da diese den Grundwasserspiegel erheblich beeinflussen können. Aufgeschüttete Feldwege sind für seine Aufgabenstellung vernachlässigbar.

Ein zuverlässiges Basis-Höhenmodell muss daher eine hohe Messpunktdichte aufweisen, damit die unterschiedlichen Aufgabenstellungen etwa einer Stadt gelöst werden können. Dabei muss für die jeweilige Anwendung die Datenmenge so verringert werden, dass sie optimal zur Anwendung passt und mit üblicher Software zu verarbeiten ist.

## 5 Vor- und Nachteile der einzelnen Messverfahren

### 5.1 Terrestrische Vermessung

Genauigkeit: ~ Millimeter-Bereich (Lage und Höhe)

Vorteile:

1. Messungen sind wiederholbar,
2. extrem genaue punktuelle Oberflächenerfassung/Einzelpunktvermessung,
3. sehr effiziente Punktverteilung bei der Erfassung der Topographie.

Nachteile:

1. relativ aufwändige Messungen,
2. Massenpunkte lassen sich damit nicht sinnvoll erfassen,
3. subjektive Auswahl relevanter Punkte im Gelände.

### 5.2 Photogrammetrie

Genauigkeit: ~ 10–100 cm (Lage u. Höhe)

Vorteile:

1. Bild der Topographie liegt vor,
2. effiziente großräumige Erfassung der Topographie,
3. Erfassung von Geländeleitlinien/Bruchkanten.

Nachteile:

1. passives Messverfahren (gute Lichtverhältnisse),
2. Genauigkeit der Messpunkte variiert innerhalb des Modells,
3. Voraussetzung guter Texturen im Luftbild,
4. Objektrekonstruktion mit min. 2 Aufnahmestrahlen,
5. Aufwendige Passpunktsignalisierung.

### 5.3 Laser-Scanning

Bei einer Messentfernung von 1000 m kann man von einer Laserstrahlgenauigkeit <20 cm ausgehen. Die Lagegenauigkeit von Objekten als Ganzes hängt zusätzlich von der Messpunktdichte und der Strahldivergenz ab.

Genauigkeit: ±15 cm Höhe und <0,2 m Lage

Vorteile:

1. gleichmäßige, dichte Punkterfassung,
2. flächenhafte repräsentative Aussagen,
3. aktives Messverfahren,
4. Punkterfassung, auch wenn keine Struktur vorhanden ist,
5. Objektrekonstruktion mit nur einem Aufnahmestrahl,
6. keine teuren Auswertegeräte nötig,
7. bei dichter Erfassung, jederzeit nachträgliche Sonderauswertungen der Daten möglich,
8. Multi-Echo Messungen erfassen zum Teil auch Bodenpunkte unter der Vegetation.

Nachteile:

1. „nur“ Erfassung von Höhendaten und keiner Strukturelemente (Geländeleitlinien),
2. anspruchsvolle Flugplanung je nach Geländeform,
3. Ergebnis ohne Zusatzauswertung ist ein Oberflächenmodell und kein Bodenmodell,
4. Es liegt kein Bild der Topographie vor.

Teile entnommen aus: (KRAUS 2000, KRAUS 2001, KRAUS 1994, KKVA 2000).

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Rechnet man ab den ersten wirklich bezahlten Aufträgen für die Erfassung von Höhenmodellen mit Airborne Laser-Scanning, dann ist dieses Verfahren gerade einmal 8 Jahre „alt“. Selbst in unserer heutigen sehr schnelllebigsten Zeit ist es also noch sehr jung. Airborne Laser-Scanning hat sich in diesen Jahren als sehr effizientes Werkzeug entwickelt und besitzt noch ein sehr hohes Entwicklungspotenzial. Viele Anwendungen, die bisher aus Kostengründen noch nicht in Betracht kamen, werden durch diese Messmethodik erst bezahlbar und damit möglich. Daneben gibt es eine Vielzahl von Aufgaben, bei denen die konventionelle Vermessung durch Airborne Laser-Scanning nicht ersetzt werden kann.

## 7 Literatur

- KAHMEN, H., 1993: Vermessungskunde. – 773 S., Walter de Gruyter, Berlin.
- KATZENBEISSER, R., 2003a: About the calibration of Lidar Sensors. – Proceedings of the ISPRS WG III/3 workshop “3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data”, Dresden 8–10 Oct. 2003, Vol. XXXIV, Part 3/W13.
- KATZENBEISSER, R., 2003b: Techn.-Note on Echo Detection. – [www.toposys.com](http://www.toposys.com), public download area.
- KATZENBEISSER, R., 2003c: Techn.-Note on Intensity. – [www.toposys.com](http://www.toposys.com), public download area.
- KRAUS, K., 1994: Photogrammetrie Band 1 – 394 S., Dümmler Verlag, Bonn, S. 27, 227, 277.
- KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie Band 3 – 419 S., Dümmler Verlag, Bonn, S. 268, 286–299.
- KRAUS, K., 2001: Laser-Scanning – Ein Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie <http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/kk—konstanz01/Laser-Scanning.htm>
- KKVA 2000: Leitfaden Qualitätssicherung – Photogrammetrie und DTM-Generierung,

Konferenz der kantonalen Vermessungsämter (CH), Seite 3–4, 27–30. <http://www.kkva.ch/downloads/richtlinien/photogrammetrie/qs—photogrammetrie.pdf>,

- LÖFFLER, G., 2003: Aspects of Raster DEM Data Derived from Laser Measurements – Proceedings of the ISPRS WG III/3 workshop “3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data”, Dresden 8–10 Oct. 2003, Vol. XXXIV, Part 3/W13. ISPRS
- SCHENK, T., SEO, S. & CSATHO, B., 2001a: Accuracy study of airborne laser scanning data with photogrammetry. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV-3/W4: 113–118.
- SCHENK, T., 2001b: Modeling and Recovering Systematic Errors in Airborne Laser Scanners. – Proceedings of OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, 1–3 March 2001, Stockholm, Schweden; Publication no. 40, pp 40–48

### Links:

[www.airbornelasermapping.com](http://www.airbornelasermapping.com)  
[www.ifp.uni-stuttgart.de](http://www.ifp.uni-stuttgart.de)  
[www.ipf.tuwien.ac.at](http://www.ipf.tuwien.ac.at)  
[www.iuw.uni-vechta.de/personal/geoinf/jochen/laser-tutorial.htm](http://www.iuw.uni-vechta.de/personal/geoinf/jochen/laser-tutorial.htm)  
[www.kkva.ch](http://www.kkva.ch)  
[www.toposys.com](http://www.toposys.com)

### Anschrift der Autoren:

Dr.-Ing. ROLF KATZENBEISSER  
 e-mail: [r.katzenbeisser@toposys.com](mailto:r.katzenbeisser@toposys.com)

Dipl.-Ing. SVEN KURZ  
 e-mail: [s.kurz@toposys.com](mailto:s.kurz@toposys.com)

TopoSys GmbH,  
 Obere Stegwiesen 26, D-88400 Biberach

Manuskript eingereicht: Januar 2004  
 Angenommen: März 2004