

Akquisition von 3D-GIS Daten durch Flugzeuglaserscanning

Hans-Gerd Maas
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Technische Universität Dresden
hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de

Zusammenfassung:

Airborne Laserscanning ist ein noch relativ junges Messverfahren in der Photogrammetrie, welches sich als leistungsfähiges Werkzeug für eine Reihe von aktuellen Aufgabenstellungen in der Akquisition von Geodaten anbietet und sich innerhalb sehr kurzer Zeit ein erstaunliches Marktpotential erobert hat. Das Verfahren beruht auf einer Abtastung der Geländeoberfläche durch einen im Flugzeug installierten Laser und erzeugt digitale Oberflächenmodelle mit einer Höhengenaugigkeit von 10-20 cm. Bei Datenraten bis zu 100'000 Punkten pro Sekunde liegt die räumliche Auflösung der erzeugten Oberflächenmodelle typischerweise bei einem Punkt pro Quadratmeter.

Flugzeuglaserscanning hat sich innerhalb weniger Jahre als Standardwerkzeug für die Generierung hochauflösender und genauer digitaler Geländemodelle etabliert. Darüber hinaus hat das Verfahren der Photogrammetrie eine Reihe von neuen Anwendungsgebieten erschlossen. Beispiele dafür sind Anwendungen der flächenhaften Baumhöhen- und Holzmassenbestimmung in der Forstwirtschaft sowie die Überwachung von Hochspannungsleitungen. Große, bislang nur ansatzweise erschlossene Potentiale liegen in der automatischen Generierung von 3D-Gebäudemodellen, beispielsweise als Komponente von 3D-Stadtmodellen oder topographischen Informationssystemen.

Laserscannerdaten können in vielen Aspekten als komplementär zu Bilddaten angesehen werden und stellen damit eine wertvolle Ergänzung konventioneller photogrammetrischer Aufnahme- und Auswerteverfahren dar. Die Industrie hat dem durch die Entwicklung integrierter Messsysteme Rechnung getragen, welche einen Laserscanner, eine Digitalkamera und ein GPS/INS-System auf einer Messplattform vereinen und sich als flexibles Datenakquisitionswerkzeug für vielfältige Ausgabenstellungen anbieten.

1. Einleitung

Airborne Laserscanning (im Deutschen manchmal auch Flugzeuglaserscanning oder Flugzeuglaseraltimetrie, im Amerikanischen meist Lidar¹ genannt) geht auf Entwicklungen bei der NASA in den 80er Jahren zurück. Erste kommerzielle Systeme kamen in der ersten Hälfte der 90er Jahre auf den Markt, mittlerweile befinden sich weltweit schätzungsweise 70 Systeme im Einsatz. Das Verfahren beruht auf der reflektorlosen Entfernungsmessung durch einen im Flugzeug installierten Laser zur Geländeoberfläche. Durch die seitliche Ablenkung des Laserstrahls über einen Scanmechanismus und die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs wird ein Geländestreifen unter dem Flugzeug abgetastet (Abb. 1). Durch Laufzeitmessung von Laserpulsen oder - seltener - durch Phasenvergleich werden zunächst

¹ Light detection and ranging

Schrägentfernungen vom Flugzeug zum Boden gemessen. Mittels eines integrierten GPS/INS²-Systems werden Positions- und Orientierungsparameter der Plattform bestimmt. Durch polares Anhängen der Laserentfernungsmessung an die Flugzeugposition und -orientierung ergeben sich direkt die 3-D Koordinaten der Bodenpunkte. Durch differentielles GPS zur Bestimmung der Flugzeugposition liegen die Koordinaten zunächst im geozentrischen System vor und werden anschließend ins Landeskoordinatensystem transformiert. Beim Laserscanning spricht man üblicherweise von 2½-D Daten, da für jede X/Y-Position nur eine Höhenkoordinate bestimmt wird. Laserscannerrohdaten liegen zunächst in einer durch den Scanmechanismus, die Flugbahn und die Geländeoberfläche bestimmten räumlichen Verteilung vor. Häufig werden diese nicht ganz regelmäßig verteilten Punkte für die anwendungsspezifische Verarbeitung auf ein regelmäßiges Raster interpoliert, was die Anwendung von Programmpaketen der digitalen Bildverarbeitung erlaubt.

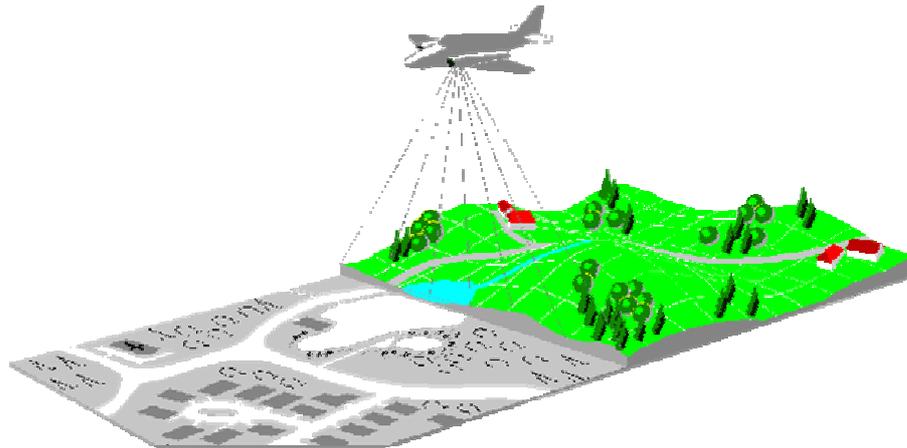


Abb. 1: Airborne Laserscanning (© TopoSys)

Laserscanning weist als aktives System gegenüber konventionellen photogrammetrischen Verfahren die Vorteile eines hohen Automatisierungsgrades sowie einer hohen Zuverlässigkeit und Schnelligkeit auf. Die Wetterabhängigkeit ist im Vergleich zur Luftbildaufnahme als weniger kritisch zu beurteilen, und die Systeme können auch nachts eingesetzt werden. Zu bedenken ist allerdings, daß die erzeugten Bodenpunkte zunächst eine quasi-zufällige und topologiefreie Geländerepräsentation darstellen. Dies erfordert gegebenenfalls noch eine Nachverarbeitung der Rohdaten.

Laserscannersysteme werden sowohl auf Flugzeugen wie auch auf Helikoptern eingesetzt. Kennzeichnende Parameter für die Beurteilung des Potentials von Laserscannersystemen sind vor allem Punktrate, Genauigkeit und Reichweite. Während die ersten kommerziellen Systeme Mitte der 90er Jahre Pulsraten von 2 - 5 KHz aufwiesen, bieten aktuelle Systeme Pulsraten von 25 - 100 KHz³. Die Höhen-genauigkeit der erzeugten Bodenpunkte liegt in flachem Gelände üblicherweise bei 10 - 20 cm (Huising und Gomes Pereira, 1998). Die maximale Flughöhe über Grund wird u.a. durch die aufgrund der Forderung nach Augensicherheit beschränkte Laserleistung bestimmt. Sie liegt bei den meisten Systemen zwischen 1000 und 3000 Metern. Bei Öffnungswinkeln des Scanmechanismus von 15° - 60° beträgt die Breite der in einem Überflug aufgenommenen Geländestreifen meist 500 - 2000 Meter. Die resultierende Punktdichte lag bei frühen Systemen bei etwa einem Punkt pro zehn Quadratmeter. Moderne Systeme sind in der Lage, Punktdichten von einem Punkt pro Quadratmeter zu erzeugen; für Sonderanwendungen sind auch schon Datensätze mit Punktdichten von mehr als 10 Punkten pro Quadratmeter erzeugt worden.

² GPS = Global Positioning System, INS = Inertial Navigation System (Trägheitsnavigationssystem): GPS dient zur Bestimmung der Position des Flugzeugs, INS dient primär zur Bestimmung der Orientierung der Sensorplattform

³ D.h. Höhenbestimmung von 25'000 - 100'000 Bodenpunkten pro Sekunde

Geländerepräsentationen dieser Dichte und Güte werden häufig als Höhenbilder bezeichnet und visualisiert (Abb. 2). Fast alle Systeme sind in der Lage, die Laufzeit mehrerer zurückkehrender Echos eines ausgesandten Laserpulses (vgl. Kap. 4) sowie deren Intensität zu messen. Neben dem sich daraus ergebenden monochromatischen Intensitätsbild erzeugen manche Systeme auch noch Schwarzweiß- oder Farbbilder durch eine integrierte Digitalkamera.

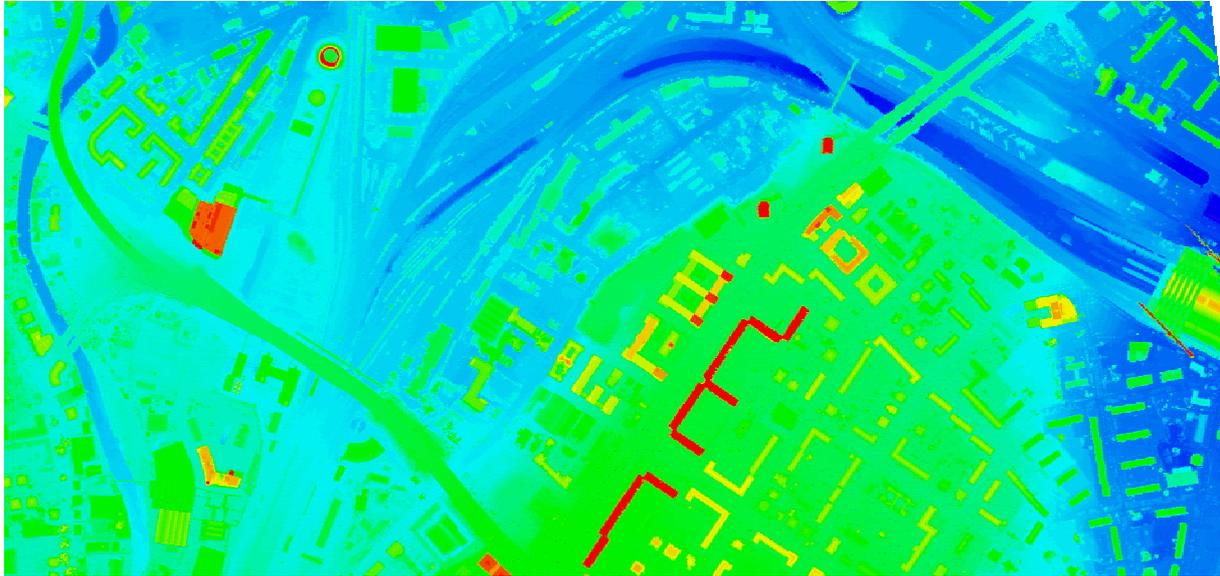


Abb. 2: Farbcodiertes Höhenbild der Einfahrt des im August 2002 überfluteten Hauptbahnhofs von Dresden (MilanFlug, © Landestalsperrenverband Sachsen)

Für die Luftbildphotogrammetrie stellt Airborne Laserscanning ein neues Messverfahren dar, welches sich in sehr kurzer Zeit als Standardverfahren für Aufgabenstellungen in der Generierung digitaler Geländemodelle etabliert hat. Darüber hinaus bietet es sich als leistungsfähiges Werkzeug für vielfältige Aufgaben der Geodatenakquisition an. Dabei ersetzt es teilweise konventionelle photogrammetrische Verfahren, stellt jedoch aufgrund der komplementären Natur der Daten primär eine willkommene Ergänzung dar, welche effiziente Lösungen für bestehende und neuartige Aufgabenstellungen erlaubt.

Im Folgenden wird zunächst kurz das Genauigkeitspotential des Verfahrens und der Einsatz im 'klassischen' Einsatzgebiet der Generierung hochwertiger digitaler Geländemodelle diskutiert. In den darauf folgenden Kapiteln werden einige Beispiele für aktuelle und zukünftige Anwendungsgebiete im Bereich der Bestimmung von 3D-GIS Information im weitesten Sinne diskutiert. Als Beispiele dienen dabei Anwendungen in der Forstwirtschaft, die automatische Generierung von 3D-Gebäudemodellen sowie die technische Überwachung von Hochspannungsleitungen.

2. Genauigkeitspotential

Das eingangs erwähnte Genauigkeitspotential des Verfahrens von ca. 10-20 cm ergibt sich aus Fehlern einer Reihe von Einzelkomponenten (Maas, 2002). Dabei trägt die eigentliche Laserdistanzmessung - zumindest bei ebenem Grund - nur mit 3-4 cm zum Gesamtfehler bei. Als Hauptfehlerquelle und genauigkeitslimitierender Faktor ist meist die Höhenbestimmung des Flugzeugs durch differentiell GPS anzusehen.

Beim Vergleich des Potentials von Airborne Laserscanning mit konkurrierenden Messverfahren ist zwischen Genauigkeit, Auflösung und Zuverlässigkeit zu unterscheiden. Eine vergleichbare Höhengenaugigkeit läßt sich auch aus Luftbildern aus einer Flughöhe von 1000-2000 Metern erzielen⁴. Aller-

⁴ Faustformel: Flughöhe über Grund durch 10'000

dings ist die Zuverlässigkeit automatischer Bildzuordnungsverfahren deutlich niedriger, wodurch der interaktive Nachbearbeitungsaufwand wesentlich erhöht wird. Flugzeuggestützte InSAR-Systeme⁵ eignen sich mit Streifenbreiten von bis zu 10 km zur Ausnahme größerer Flächeneinheiten, bieten aber bestenfalls ein Genauigkeitspotential von 50cm.

Die räumliche Auflösung von Flugzeuglaserscannersystemen wird durch die Datenrate sowie die Fluggeschwindigkeit und die Breite des aufgenommenen Geländestreifens bestimmt. Sie liegt bei aktuellen Systemen meist in der Größenordnung von einem Punkt pro Quadratmeter und ist damit zunächst deutlich geringer als die Auflösung gescannter Luftbilder, welche bei vergleichbaren Flughöhen und Streifenbreiten bei 5-10 cm liegt. Andererseits haben aus stereoskopischen Luftbildern generierte Geländemodelle aufgrund der Kontrastabhängigkeit und der Eigenschaften der verwendeten Bildzuordnungsverfahren meist eine räumliche Auflösung, die deutlich geringer ist als diejenige von Flugzeuglaserscannersystemen. Somit sind die beiden Verfahren also als weitgehend komplementär anzusehen: Konventionelle Luftbilder bieten eine hohe (zweidimensionale) räumliche Auflösung und einen hohen visuellen Interpretationsgehalt, während Flugzeuglaserscannerdaten sich für die Generierung hochauflösender und zuverlässiger Geländemodelle eignen.

Während in der Frühzeit des Airborne Laserscanning das Genauigkeitspotential des Verfahrens ausschließlich durch die Angabe der Höhengenaugkeit charakterisiert wurde, wird bei aktuellen Betrachtungen zunehmend auch die Lagegenauigkeit relevant (Maas, 2003). Die Beschränkung auf die Betrachtung der Höhengenaugkeit war weitgehend berechtigt, solange das Verfahren mit einem Punktabstand von 3-4 Metern zur Erzeugung von digitalen Geländemodellen in Gebieten mit geringer bis mäßiger Geländeneigung eingesetzt wurde. Mit der steigenden räumlichen Auflösung von Flugzeuglaserscannersystemen im Zuge der rasanten technischen Entwicklung der letzten Jahre und den sich daraus ergebenden neuen Anwendungsgebieten, beispielsweise in der Generierung von 3D-Gebäudemodellen (Kap. 0), erhält jedoch auch die Lagegenauigkeit von Laserscannerdaten (und daraus abgeleiteten Produkten) zunehmende Bedeutung. Die Lagegenauigkeit wird wesentlich durch die Genauigkeit der Bestimmung der Plattformorientierung durch INS sowie durch den im Gerät verwendeten Scanmechanismus bestimmt. Sie ist - im Gegensatz zur Höhengenaugkeit - beinahe linear von der Flughöhe über Grund abhängig. In Herstellerangaben und in der Literatur (Maas, 2003) wird die Lagegenauigkeit mit etwa 0,05% der Flughöhe über Grund angegeben. Damit ist beim Airborne Laserscanning die Höhengenaugkeit i.d.R. deutlich besser als die Lagegenauigkeit. Auch in diesem Aspekt kann das Verfahren als komplementär zur konventionellen Luftbildphotogrammetrie angesehen werden, bei der aufgrund des Basis-Höhen-Verhältnisses die Lagegenauigkeit bei der stereoskopischen Auswertung normalerweise deutlich besser ist als die Höhengenaugkeit.

3. 'Klassische' Anwendung - DTM-Generierung

Aufgrund seiner Eigenschaften bietet sich Airborne Laserscanning zunächst als Verfahren für die Generierung von räumlich hochauflösenden digitalen Oberflächenmodellen an. Frühe Anwendungen hatten beispielsweise die Überwachung von Stränden mit dem Ziel der Erfassung von Erosions- und Anlandungsprozessen zum Ziel. Im Vergleich zum konkurrierenden Verfahren der automatischen Auswertung stereoskopischer Luftbilder durch Bildzuordnungsverfahren bietet Airborne Laserscanning als aktives Messverfahren hier den Vorteil der Unabhängigkeit von jeglicher Oberflächentextur. Weitere frühe Anwendungen dienten der Aufnahme potentieller Überschwemmungsgebiete mit dem Ziel der Akquisition genauer Höheninformation als Basis für Simulationsrechnungen und als Grundlage für Planungsmaßnahmen. Durch Airborne Laserscanning generierte Geländemodelle werden beispielsweise auch von Versicherungsgesellschaften für Risikoanalysen mit dem Ziel einer räumlich detaillierten Überschwemmungsvorhersage verwendet (Murtagh/Foote, 1999).

⁵ Interferometric Synthetic Aperture Radar

Die Kernaufgabe bei der Anwendung von Airborne Laserscanning zur Generierung von digitalen Geländemodellen besteht in der Filterung der Daten. Airborne Laserscanning erzeugt zunächst ein digitales Oberflächenmodell, aus dem anschließend nicht zum Geländemodell gehörende Objekte wie Vegetation, Gebäude, Brücken, etc. entfernt werden müssen⁶ (Abb. 3). Filterverfahren für Laserscannerdaten beruhen meist direkt oder indirekt auf Informationen oder Annahmen über maximale Geländeneigungen. (Kilian et al., 1996) verwenden Verfahren der mathematischen Morphologie zur Filterung von auf ein Raster interpolierten Laserscannerdaten. (Kraus/Pfeifer, 1997) zeigen eine Interpolationsmethode, bei der, ausgehend von der schiefssymmetrischen Fehlerverteilung⁷ der Laserscannerpunkte bei der Generierung von digitalen Geländemodellen, hohe Punkte durch eine Gewichtsfunktion in einer iterativen Prozedur eliminiert werden. (Vosselman, 2000) zeigt ein Verfahren, welches als Implementation der mathematischen Morphologie auf Laserscannerrohdaten in einer TIN⁸-Struktur angesehen werden kann, bei der die optimale Filterfunktion aus Trainingsgebieten im Datensatz abgeleitet wird.

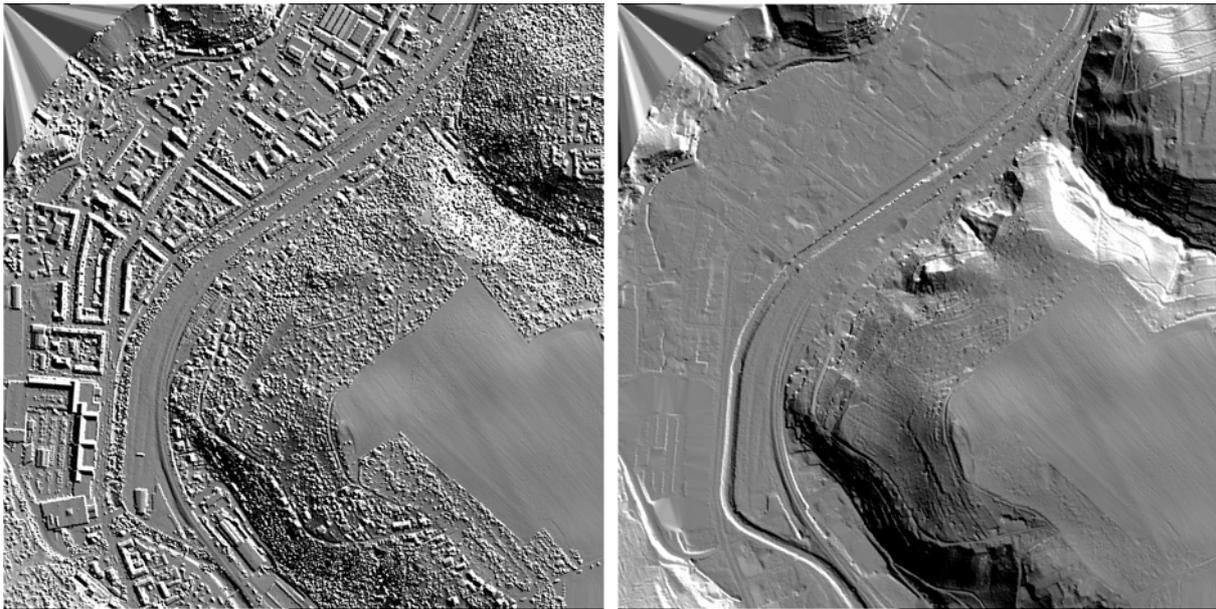


Abb. 3: Laserscannerdaten (Shadingdisplay) vor und nach Filterung (MilanFlug, © Landestalsperrenverband Sachsen)

Zusätzlich zu den bereits genannten Vorteilen ist Airborne Laserscanning, im Gegensatz zu herkömmlichen photogrammetrischen Verfahren, in der Lage, Geländemodelle auch in bewaldeten Gebieten zu bestimmen (vgl. Kap. 4). Je nach Waldart (Laub- oder Nadelwald) und Jahreszeit dringen 30 - 65% der Laserpulse bis zum Waldboden durch (Hoss, 1997); dies reicht aus, um durch Filterverfahren ein digitales Geländemodell des Waldbodens bestimmen zu können (Kraus/Pfeifer, 1997). Einschränkungen ergeben sich lediglich in sehr dichten Nadelholzbeständen oder in tropischem Regenwald. In einer Studie zum Genauigkeitspotential von Airborne Laserscanning zur Bestimmung von digitalen Geländemodellen in Waldgebieten erzielten (Kraus/Pfeifer, 1998) Standardabweichungen von 26 cm für die Höhen von Bodenpunkten in flachen Gebieten und bis zu etwa einem Meter bei 70% Geländeneigung. Hierbei ist zu bedenken, daß bei steilem Gelände Höhenfehler auch als Folge nicht-kompensierter Lagefehlern entstehen können.

Die Niederlande haben in den Jahren 1998 - 2000 als weltweit erstes Land ein flächendeckendes digitales Geländemodell des gesamten Landes durch Airborne Laserscanning generiert (AHN - Algemeen

⁶ (Haugerud/Harding, 2001) sprechen in diesem Zusammenhang sehr anschaulich als 'virtual deforestation'.

⁷ Ungefilterte Laserscannerdaten zur Beschreibung der Geländeoberfläche weisen kleine negative Fehler (Messfehler von ca. 1-2 dm), aber große positive Fehler (Punkte auf Vegetation etc.) auf.

⁸ Triangulated irregular network

Hoogtemodel Nederland, Wouters/Bollweg, 1998). Das Modell besteht bei einem mittleren Punktabstand von 3-4 Meter aus insgesamt ca. 3 Milliarden Einzelpunkten, die eine Höhengenaugigkeit von ca. 15 cm aufweisen (Huising und Gomes Pereira, 1997). Das AHN dient als multifunktionale Geodatenbasisinfrastruktur. Wichtigste Anwendungen für die Daten des AHN sind Risikoanalyse und Überschwemmungsvorhersage, Drainage und Grundwasserspiegelplanung sowie Infrastrukturplanung. Darüber hinaus sind die Daten aber auch für Anwendungen wie Sichtbarkeitsanalysen, Telekommunikationsnetzplanung, Schallausbreitung und die Analyse der Ventilation von Stadtgebieten von Interesse. Auch in Deutschland wurden bereits in den 90er Jahren größere Gebiete befliegen (Hoss, 1997; Petzold et al., 1999). Derzeit sind weitere Projekte zum Aufbau von hochwertigen digitalen Geländemodellen – häufig als Ersatz für vorliegende Höhenmodelle aus digitalisierten Höhenlinien mit entsprechend geringer Genauigkeit, ungünstiger räumlicher Verteilung und einem Nachführungsstand von zum Teil über 100 Jahren – in deutschen Bundesländern und anderen europäischen Staaten in Ausführung bzw. in Planung. Obwohl bei vielen dieser Projekte der Auftraggeber den Anbietern die Wahl des Meßverfahrens freistellt, hat sich Airborne Laserscanning doch binnen sehr kurzer Zeit als Standardverfahren zur Generierung hochgenauer digitaler Geländemodelle durchgesetzt.

Die Generierung von digitalen Geländemodellen allein aus einem regelmäßigen Punktraster oder aus Punkten in einer quasi-regelmäßigen Verteilung, wie sie bei Laserscannerrohdaten vorliegt, ist für die meisten Anwendungen als unzureichend zu betrachten. Zum einen sind die Ergebnisse der automatischen Filterung der Daten mit dem Ziel der Erzeugung des digitalen Geländemodells aus dem digitalen Höhenmodell nicht immer perfekt und verlangen eine interaktive Nachverarbeitung⁹; zum anderen werden aufgrund der quasi-zufälligen Bodenpunktverteilung Bruchkanten im Datensatz nicht immer ausreichend repräsentiert. Daher werden häufig zusätzlich noch interaktiv gemessenen Bruchkanten zur Verbesserung der Geländerepräsentation verwendet. Die Notwendigkeit der Erfassung von Bruchkanten bei durch Laserscanning erzeugten digitalen Geländemodellen sinkt aufgrund der Repräsentationsgüte mit zunehmender Punktdichte der Datensätze. Für eine bestmögliche Geländerepräsentation sind jedoch auch bei hoher Punktdichte des Laserscannerdatensatzes zusätzliche Bruchkanten erwünscht. In manchen Anwendungen geht man dazu so vor, daß die Bruchkanten interaktiv in Luftbildern des Gebiets gemessen werden. Ansätze zur automatischen Detektion von Bruchkanten durch auf Laserscannerdaten adaptierte Bildverarbeitungsoperatoren werden in (Brügelmann, 2000) und (Kraus/Pfeifer, 2001) gezeigt.

4. Anwendungen in der Forstwirtschaft

Die Tatsache, daß Airborne Laserscanning in der Lage ist, digitale Geländemodelle auch in bewaldeten Gebieten zu erzeugen, liegt darin begründet, daß ein Teil der Laserscannerpulse bis zum Waldboden durchdringt. Moderne Laserscannersysteme messen pro ausgesandten Laserpuls die Laufzeit für mindestens zwei reflektierte Pulse. Im Falle des Einsatzes über Waldgebiet erhält man eine erste Reflexion aus den Baumkronen ('first pulse'). In vielen Fällen wird aber ein Teil des Laserpulses, welcher typischerweise bei einer Strahldivergenz von 0.25 mrad einen Durchmesser von wenigen Dezimetern haben wird, die Baumkrone durchdringen und vom Waldboden reflektiert werden ('last pulse'). Im idealen Fall wird also mit einem Laserpuls sowohl ein Punkt des Oberflächenmodells (hier: Kronenmodell) wie auch ein Punkt des Geländemodells gemessen (Abb. 4), woraus sich dann direkt auch Informationen über Baumhöhen ableiten lassen.

⁹ Dieser Nachbearbeitungsaufwand macht jedoch meist nur einen Bruchteil des Aufwandes der interaktiven Nachbearbeitung von durch Bildzuordnungsverfahren aus stereoskopischen Luftbildern automatisch generierten Geländemodellen aus.

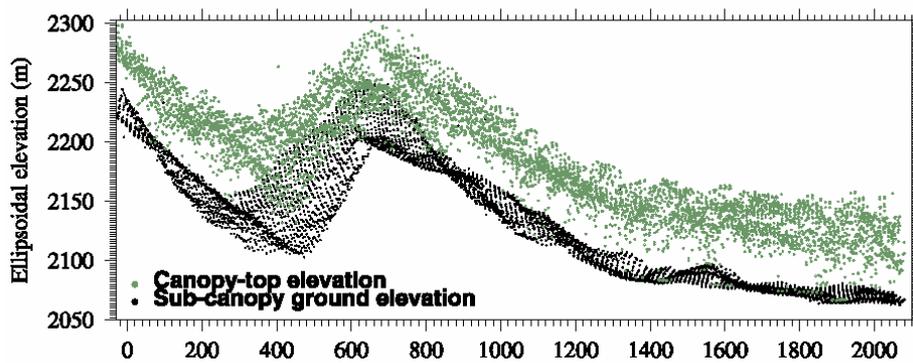


Abb. 4: Modell des Waldbodens und Kronenpunkte aus Airborne Laserscanning (© Blair et al., 1999)

Tatsächlich werden Abweichungen von dieser Idealvorstellung auftreten: Je nach Kronendichte werden nicht alle Pulse bis zum Waldboden durchdringen; aus dem Inneren der Krone oder vom Stamm reflektierte Pulse müssen - wiederum unter der Annahme von Vorwissen über Geländeformen und maximale Geländeneigungen - durch Filterverfahren eliminiert werden. Außerdem stellen Laserscannerdatensätze aufgrund des Verhältnisses zwischen dem mittlerem Punktabstand (ca. 1m) und dem Pulsdurchmesser (ca. 25cm) meist eine Unterabtastung dar; dies wird bewirken, daß nicht immer der höchste Punkt einer Baumkrone getroffen wird, so daß Baumhöhen tendenziell zu niedrig bestimmt werden.

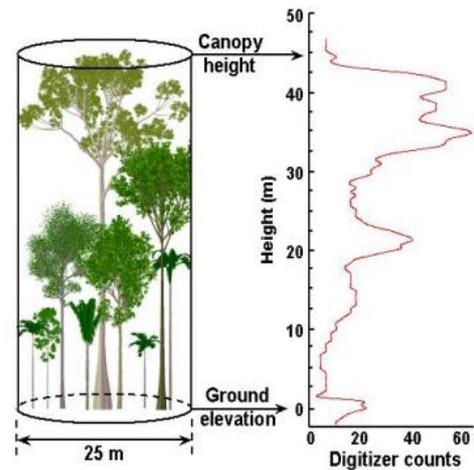
Trotz dieser geringfügigen Einschränkungen stellt Airborne Laserscanning ein interessantes Messverfahren für eine Reihe von Anwendungen in der Forstwirtschaft dar. Erste praktische Tests wurden in (Næsset, 1997) gezeigt. In vielen Fällen werden durch Laserscanning mittlere Baumhöhen für Stände mit einer Fläche von typischerweise 1 - 10 ha bestimmt. Der o.g. systematische Fehler wird dabei durch empirische Additionskorrekturen kompensiert. (Heurich et al., 2003) ermittelten anhand einer Stichprobe von 1000 Einzelbäumen im Nationalpark Bayerischer Wald eine systematische Unterschätzung der Baumhöhe von 53 cm und eine Standardabweichung von 90 cm. Über forstwirtschaftliche Berechnungsmodelle kann aus solchen Baumhöhendaten, kombiniert mit Wissen über Art und Alter der Bestände, das Holzvolumen und die Biomasse des gesamten Standes bestimmt werden. In (Lefsky et al., 2001) wird eine Übereinstimmung von 84% zwischen aus Laserscannerdaten abgeleiteter und durch Feldmessungen ermittelter Biomasse erzielt. Durch Befliegungen in regelmäßigen Zeitabständen können außerdem das Wachstum und die Zunahme des Holzvolumens bzw. der Biomasse von Ständen und damit auch die Wirksamkeit von Forstbeständen als CO₂-Speicher bestimmt werden.

Neuere Arbeiten versuchen, basierend auf Daten mit hoher Punktdichte, Einzelbäume in den Laserscannerdaten zu detektieren und für diese Parameter wie Höhe, Kronendurchmesser und -form sowie Bewuchsdichte zu bestimmen. Daraus können idealerweise sogar Baumarten bestimmt werden. (Hyypä et al., 2001) erreichen dabei Standardabweichungen von 1.8 m (10%) für die Baumhöhe, 10% für die Kronenfläche und 10% für das Holzvolumen. (Schardt et al., 2002) erzielten ähnliche Werte.

Aktuelle Entwicklungen bei der NASA erweitern die Möglichkeit der 'first pulse' und 'last pulse' Aufnahme in der Weise, daß für jeden ausgesandten Laserpuls statt diskreter Pulse ein komplettes Intensitätsprofil des reflektierten Echos digitalisiert wird (Blair et al., 1999). Dies geschieht durch einen A/D-Wandler im Gigahertzbereich, der eine vertikale Auflösung von 11 cm im digitalisierten Echo ermöglicht. Dieses 'waveform digitization' genannte Verfahren wird auf stark aufgeweitete Laserpulse mit einem Durchmesser von einigen Metern angewandt und erlaubt die Analyse von vertikalen Dichteprofilen in Waldgebieten (Abb. 5). Eine Reihe von praktischen Tests des Verfahrens wurde mit einem flugzeuggestützten System durchgeführt (Drake et al., 2002); dabei wurde 93% Übereinstimmung zwischen der aus den Dichteprofilen abgeleiteten Biomasse und Feldmessungen erzielt. Das Verfahren war ursprünglich für eine - unterdessen mehrfach zurückgestellte - Satellitenmission der NASA mit

dem Ziel einer zehnfachen Verbesserung der globalen Biomassenschätzung vorgesehen (VCL - vegetation canopy lidar).

Abb. 5: NASA LVIS footprint und zugehörige waveform (© Cowden et al., 2002)



5. Automatische Generierung von 3-D Gebäudemodellen

Flugzeuglaserscannerdaten stellen eine wertvolle Datenquelle für die Generierung von 3D-Gebäudemodellen dar, welche beispielsweise einen wesentlichen Bestandteil von 3D-Stadtmodellen bilden. Für deren effiziente Generierung besteht großes Interesse an automatischen Verfahren der Generierung von 3D-Gebäudemodellen. Darüber hinaus sind beispielsweise Versicherungen und Finanzbehörden an einer Volumenbestimmung von Gebäuden als Grundlage für Versicherungstarife oder die Besteuerung von Gebäuden interessiert. Quasi als Nebenprodukt kann ein Verfahren zur automatischen Detektion und Modellierung von Gebäuden in Flugzeuglaserscannerdaten auch als Werkzeug im Zuge einer (teil-)automatischen Kartennachführung (Abb. 6) verwendet werden.

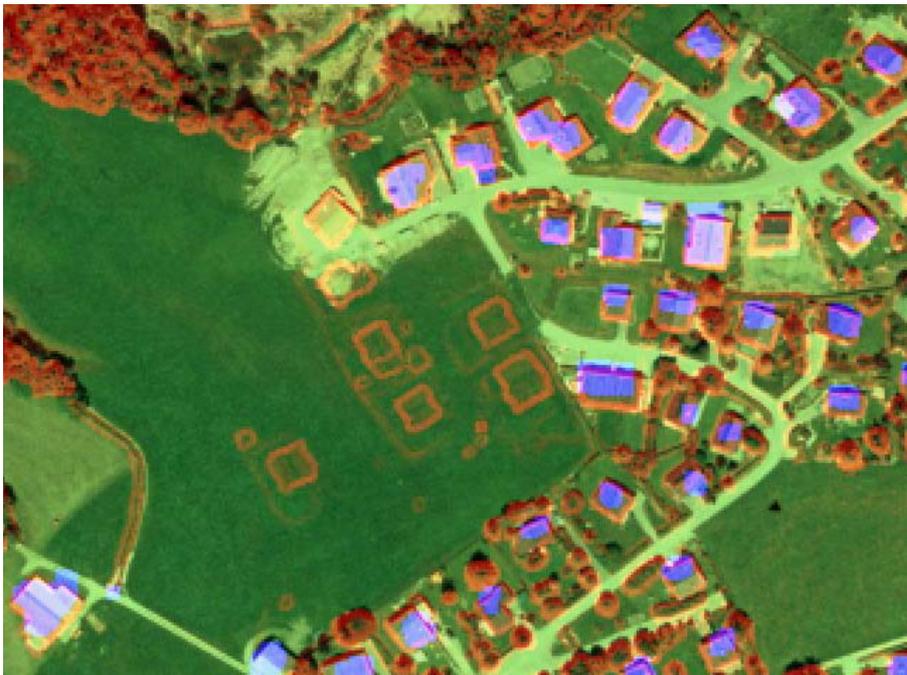


Abb. 6: Automatisch aus Laserscannerdaten detektierte Gebäudeumrisse (Hofmann et al., 2002)

Im Laufe der letzten Jahre wurden eine Reihe von Ansätzen zur vollautomatischen Generierung von 3D-Gebäudemodellen aus hochauflösenden Flugzeuglaserscannerdaten entwickelt. Die Segmentierung der Daten (Abb. 7) mit dem Ziel der Extraktion von Gebäudepunkten kann dabei als invers zur Aufgabe der Filterung angesehen werden und basiert meist auf entsprechend modifizierten Verfahren der Bildverarbeitung. Zur Vermeidung von Interpolationseffekten basieren dabei viele Ansätze auf den

'rohen' unregelmäßig verteilten Punktdaten, was meist eine Implementierung von Bildverarbeitungsverfahren auf Daten in einer TIN-Struktur erfordert.

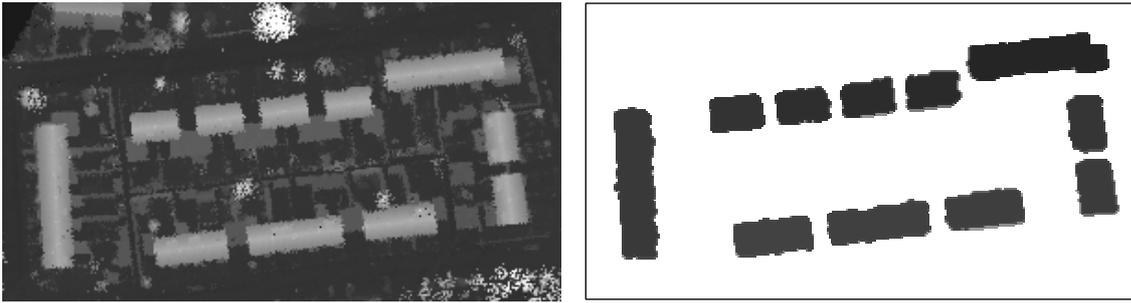


Abb. 7: Grauwertcodierte Darstellung eines Laserscannerdatensatzes, durch Segmentierung extrahierte Gebäudegrundrisse (Maas, 1999a)

Die in der Literatur publizierten Ansätze lassen sich grob in die Kategorien 'model-driven' und 'data-driven' unterteilen.

- Bei Ansätzen der Kategorie 'model-driven' wird versucht, ein synthetisches Gebäudemodell durch Variation der Modellparameter nach einem vorgegebenen Kriterium optimal in eine segmentierte Punktwolke einzupassen. In (Haala/Brenner, 1997) wird dazu ein Ansatz der Kleinste-Quadrate-Ausgleichung verwendet. (Maas, 1999b) präsentiert eine geschlossene Lösung für die Bestimmung von 3D-Gebäudemodellen auf Basis der Analyse invarianter Momente von Punktwolken, die im Zuge der weiteren Analyse sogar die Modellierung von Dachgauben erlaubt (Abb. 8). Bei komplexen Grundrissen empfiehlt sich bei diesen Ansätzen die Segmentierung einer Punktwolke in Gebäudeprimitive, welche zunächst unabhängig voneinander rekonstruiert werden und dann - ggf. unter Anwendung von Zwangsbedingungen - fusioniert werden (Haala et al., 1998).



Abb. 8: Automatisch generierte 3D-Gebäudemodelle (Maas, 1999b)

- Ansätze der Kategorie 'data-driven' versuchen, in Punktwolken einzelne Dachflächen zu detektieren, diese sinnvoll abzugrenzen und zu gruppieren und daraus komplette 3D-Gebäudemodelle abzuleiten. In (Vosselman, 1999) werden Dachflächen durch eine modifizierte 3D Hough-Transformation detektiert. (Hofmann et al., 2002) beschreibt eine Clusteranalyse im Parameterraum einer TIN-Struktur grob segmentierter Punktwolken. (Rottensteiner/Briese, 2002) segmentieren einzelne Dachflächen durch einen region growing Ansatz auf Basis der lokalen Oberflächenneigung. (Schwalbe et al., 2004) simulieren im automatischen Ansatz die Intuition der Betrachters bei der interaktiven Manipulation von Punktwolken, indem sie in gezielten 2D-Projektionen der Punktwolke nach Linien suchen und diese sukzessive zu Dachflächen und Gebäudemodellen kombinieren (Abb. 9).

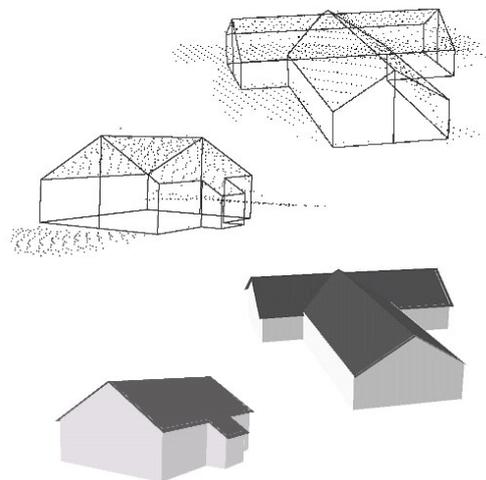


Abb. 9: 3D-Gebäudemodelle (Schwalbe et al., 2004)

Weiterhin kann unterschieden werden zwischen generischen Ansätzen, welche 3D-Gebäudemodelle pur aus Laserscannerdaten generieren, und Verfahren, die vorhandene Daten - wie etwa Grundrisse aus Katasterdaten - nutzen (z.B. Vosselman/Dijkman, 2001).

Die Qualität von automatisch aus Flugzeuglaserscannerdaten generierten 3D-Gebäudemodellen wird durch die geometrische Genauigkeit, vor allem aber die Korrektheit und Vollständigkeit der Rekonstruktion definiert. Die Positionsgenauigkeit rekonstruierter Gebäude ist im Wesentlichen durch die in Kap. 2 diskutierte Lagegenauigkeit der Daten gegeben. Die Genauigkeit der aus der Rekonstruktion abgeleiteten Gebäudemäße hängt stark von der Punktdichte ab. Aufgrund der Höhengenaugigkeit und des mittleren Punktabstandes von Flugzeuglaserscannerdaten ist dabei die Höhenkomponente meist genauer als der Grundriß. Untersuchungen anhand eines dichten Datensatzes mit ca. 5 Punkten pro Quadratmeter haben für die Höhe und Breite korrekt rekonstruierter Gebäudemodelle Standardabweichungen von 10-20 cm ergeben; für die Dachneigung und die Orientierung des Dachfirstes ergaben sich Standardabweichungen von 1-2° (Maas, 1999b). Die Korrektheit und Vollständigkeit der Rekonstruktion ist wesentlich schwieriger quantitativ zu beurteilen, zumal jede Rekonstruktion in gewisser Weise auch eine Generalisierung beinhaltet. Auf der Basis eines ländlichen bzw. dörflichen Testgebietes mit 100 Gebäuden ermitteln (Hofmann/Schwalbe, 2004) eine Erfolgsrate von 70% korrekt, 17% leicht fehlerbehaftet und 13% falsch bzw. gar nicht rekonstruierter Gebäude. Auch wenn diese Untersuchung selbstverständlich nicht als repräsentativ für die Beurteilung der Zuverlässigkeit von Verfahren der automatischen Rekonstruktion von 3D-Gebäudemodellen aus Flugzeuglaserscannerdaten angesehen werden kann, indiziert sie doch, daß die bislang entwickelten Verfahren noch nicht für eine zuverlässige vollautomatische Prozessierung großer Bereiche geeignet sind. Auch wird derzeit noch kein kommerzielles Softwarewerkzeug angeboten. Dennoch beweisen die bislang in der Literatur publizierten Ansätze und Resultate die Eignung von Flugzeuglaserscannerdaten für Aufgabenstellungen dieser Art und das durch die Strukturiertheit der 2^{1/2}D-Punktwolken gegebene hohe Automatisierungspotential.

6. Überwachung von Hochspannungsleitungen

Eine weitere Kategorie von Anwendungen des Airborne Laserscanning wird unter dem Begriff 'Corridor Mapping' zusammengefaßt. Dabei geht es um die Akquisition von Daten entlang von korridorförmigen Objekten wie beispielsweise Bahntrassen, Straßen oder Hochspannungsleitungen. Aufgrund der schmalen Streifenbreite von meist etwa 50 - 200 Meter können hier kompakte Systeme mit geringer Laserleistung in niedrigen Flughöhen im Helikopter eingesetzt werden.

(Lynch/Hilger, 1996) zeigen ein Anwendungsbeispiel bei der Planung von Hochspannungsleitungstrassen. Laserscannerdaten werden hier – zusammen mit Kartenunterlagen und weiteren Planungsdaten – in einem Werkzeug zur Trassenplanung verwendet, um zunächst die optimale Trasse festzulegen und danach in der Trasse Abstände und Höhen der Masten so zu wählen, daß die Kabel auch bei maximaler Längung durch Außentemperatur und Stromstärke den vorgeschriebenen Sicherheitsabstand zum Boden einhalten.

Neben der Planung hat sich insbesondere die Überwachung von Hochspannungsleitungen als Aufgabe erwiesen, die sehr effizient durch Laserscanning gelöst werden kann. Hochspannungsleitungen müssen in regelmäßigen Zeitabständen überwacht werden, um sicherzustellen, daß nicht durch Alterungsprozesse der vorgeschriebene Mindestabstand der einzelnen Kabel zum Boden unterschritten wird, und um in Waldgebieten die Sicherheitsabstände zwischen Kabeln und Vegetation zu überprüfen. Dazu wird die gesamte Trasse mit einem Laserscanner in einem Helikopter in geringer Höhe überflogen. Die Empfindlichkeit geeigneter Laserscannersysteme reicht aus, um Reflektionen des Laserpulses von den Kabeln der Hochspannungsleitung zu erfassen. Ein Datensatz über einer Hochspannungsleitung wird also neben Bodenpunkten sowohl Punkte auf der Vegetation wie auch Punkte auf den Kabeln enthalten (Abb. 10). Die Aufgabe bei der automatischen Verarbeitung der Laserscannerdaten besteht nun also nach der Filterung der Daten in einer weiteren Klassifikation der durch die Filterung als

Nicht-Bodenpunkte identifizierten Punkte in die Kategorien 'Kabel' und 'Vegetation' (Axelson/Sterner, 1999). Hierzu sind jedenfalls nicht-interpolierte Rohdaten in ihrer ursprünglichen räumlichen Verteilung notwendig. Dabei kann das Vorwissen über die Verteilung der Kabelpunkte auf einer leicht gekrümmten Linie, deren Projektion etwa parallel zur Flugrichtung liegt, für eine 3-D Linienverfolgung genutzt werden. In die so extrahierten Kabelpunkte wird jeweils zwischen zwei Masten eine ausgleichende dreiparametrische Kettenlinie eingepaßt. Ausgehend von dieser Kettenlinie kann dann, eventuell nach Anbringen einer Korrektur zur Berücksichtigung der Kabellängung bei maximaler thermischer Belastung, der minimale vertikale Abstand zum Boden und der minimale vertikale und horizontale Abstand zur Vegetation bestimmt werden.

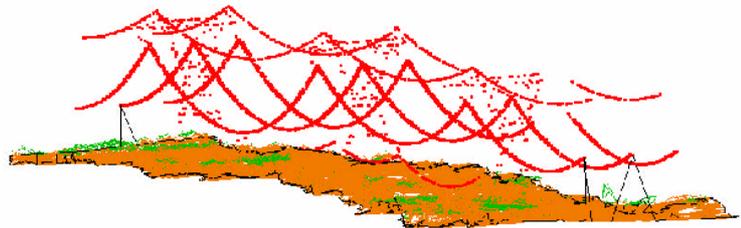


Abb. 10: Laserscannerdaten einer Hochspannungsleitung (Murtagh, 2001)

Diese Aufgabenstellung kann als ein weiteres Beispiel für eine Anwendung angesehen werden, welche bisher einen hohen Personalaufwand für Begehungen der Trasse erforderte und nun durch Airborne Laserscanning sehr effizient gelöst werden kann und somit der Photogrammetrie neue Marktpotentiale geöffnet hat.

7. Ausblick

Airborne Laserscanning ist eine noch sehr junge Technik in der Photogrammetrie, welche erst seit ca. 10 Jahren als kommerziell einsetzbares Messverfahren verfügbar ist. Das Verfahren hat sich in erstaunlich kurzer Zeit als Standardverfahren für eine Reihe von Anwendungsgebieten etabliert. Hochauflösende genaue digitale Geländemodelle werden mittlerweile fast ausschließlich aus Flugzeuglaserscannerdaten generiert.

Gleichzeitig hat sich das Verfahren in den 10 Jahren seiner Existenz rapide entwickelt. Dies wird vor allem bei der Betrachtung der Datenrate offensichtlich, welche von 2 kHz bei den ersten Systemen Mitte der 90er Jahre auf nunmehr 100kHz bei aktuellen Systemen gesteigert werden konnte. Parallel zu der Entwicklung in der Sensortechnologie wurden eine Reihe von Verfahren der automatischen Datenverarbeitung entwickelt. Die Kombination leistungsfähiger Messsysteme mit Verfahren der automatischen Extraktion von dreidimensionaler Information aus Punktwolken hat - über die Standardanwendungen im Bereich der Generierung digitaler Geländemodelle hinaus - für die Erschießung neuer Marktsegmente für die Photogrammetrie gesorgt. Aktuelle Beispiele hierfür sind die Überwachung von Hochspannungsleitungen und die Datenakquisition in Anwendungen der Forstwirtschaft. Ein sehr großes, wenngleich derzeit noch nicht vollständig erschlossenes Potential liegt in der automatischen Generierung von 3D-Gebäudemodellen.

Die komplementären Eigenschaften von Flugzeuglaserscannerdaten und digitalen Luftbildern legen natürlich die Datenfusion bei der Nutzung und Verarbeitung der Daten nahe. Dem trägt auch die derzeitige Entwicklung im Bereich der Sensorik Rechnung, die zunehmend hochauflösende digitale Kameras in Laserscannersysteme integriert¹⁰. Die gemeinsame Nutzung beider Datenquellen in Visualisierungsaufgaben ist naheliegend: Bei der Generierung von Orthophotos, virtuellen Überflügen oder Virtual-Reality-Modellen bietet sich die Kombination von dreidimensionaler Objektinformation aus Laserscannerdaten mit der Texturinformation geometrisch referenzierter Bilddaten an. Forschungsaktivitäten an Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen mit dem Ziel der automatischen Extraktion dreidimensionaler GIS-Daten haben sich bislang eher auf die ausschließliche Nutzung von

¹⁰ Dieselbe Entwicklung ist derzeit auch im Bereich terrestrischer Laserscannersysteme zu beobachten

Laserscannerdaten konzentriert. Dies ist insofern berechtigt, als dadurch das Potential des Messverfahrens bzw. der Daten analysiert und ausgeschöpft werden kann. Zukünftige Forschungsaktivitäten sollten sich jedoch - über Visualisierungsaufgaben hinaus - verstärkt auf die Fusion der komplementären Daten fokussieren. In den diskutierten Aufgabenstellungen der automatischen Generierung von 3D-Gebäudemodellen liegen hier noch große Potentiale. Auch läßt sich das - ohnehin schon hohe - Genauigkeitspotential eines integrierten Laserscanner-Kamera-Systems durch die gemeinsame Prozessierung von Daten mit unterschiedlicher Genauigkeitscharakteristik noch beträchtlich steigern.

Literatur

1. Axelsson, P., Sterner, H., 1999: Mapping electrical powerlines with laser scanning. *GIM International* 3/99
2. Blair, B., Rabine, D., Hofton, M., 1999: The Laser Vegetation Imaging Sensor: A medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, pp. 115-122
3. Brügelmann, R., 2000: Automatic breakline detection from airborne laser range data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 33, Part B3, pp. 109-116
4. Cowden, C., Weishampel, J., Blair, B., Clark, D., Dubayah, R., Hofton, M., Knox, R., 2002: Using lidar to discern primary, secondary, and selectively-logged rainforest canopy structure. *International Canopy Conference*, Cairns, Australia
5. Drake, J., Dubayah, R., Clark, D., Knox, R., Blair, B., Hofton, M., Chazdon, R., Weishampel, J., Prince, S., 2002: Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 79, pp. 305-319
6. Haala, N., Brenner, K., 1997: Generation of 3D city models from airborne laser scanning data. *Proceedings EARSEL Workshop on LIDAR remote sensing on land and sea*, Tallinn/Estonia
7. Haala, N., Brenner, C., Anders, K.-H., 1998: 3D Urban GIS from Laser Altimeter and 2D Map Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, Part 3, pp. 339-346
8. Haugerud, R., Harding, D., 2001: Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of lidar topographic survey data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34-3/W4, pp. 211-217
9. Heurich, M., Schneider, Th., Kennel, E., 2003: Laser scanning for identification of forest structures in the Bavarian forest national park. *Proceedings ScandLaser Workshop*, Umeå, 3-4.9.2003
10. Hofmann, A., Maas, H.-G., Streilein, A., 2002: Knowledge-based building detection based on laser scanner data and topographic map information. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34, Part 3
11. Hofmann, A.D., Schwalbe, E. 2004: Evaluation automatisch rekonstruierter Gebäudemodelle aus Flugzeuglaserscannerdaten, 24. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 15-17. September, Halle /Saale
12. Hoss, H. (1997): Einsatz des Laser-Scanner-Verfahrens beim Aufbau des Digitalen Geändemodells DGM) in Baden-Württemberg, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, S. 131-142
13. Huising, J., Gomes Pereira, L., 1998: Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 5, pp. 245-261
14. Hyypä, J., Kelle, O., Lehtikoinen, M., Inkinen, M., 2001: A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, pp. 969-975
15. Kilian, J., Haala, N., Englich, M., 1996: Capture and evaluation of airborne laserscanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31, Part B3, pp. 383-388
16. Kraus, K., Pfeifer, N., 1997: A new method for surface reconstruction from laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, Part 3-2W3, pp. 80-86

17. Kraus, K., Pfeifer, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, Vol. 53, pp. 193-303
18. Kraus, K., Pfeifer, N., 2001: Advanced DTM generation from Lidar data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34-3/W4. pp. 23-35
19. Lefsky, M., Cohen, W., Harding, D., Parker, G., Acker, S., Gower, Th., 2001: Lidar Remote Sensing of Aboveground Biomass in Three Biomes. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV-3/W4, pp. 150-160
20. Lynch, O., Hilger, P., 1996: Re-Engineering the transmission line design process. *Power Technology International Magazine*
21. Maas, H.-G., 1999a: The potential of height texture measures for the segmentation of airborne laserscanner data. *Proceedings of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference, Ottawa, 21.-24.6.99, Vol. I*, pp. 154-161
22. Maas, H.-G., 1999b: Closed solutions for the determination of parametric house models from invariant moments of airborne laserscanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 32, Part 3-2W5*, pp. 193-199
23. Maas, H.-G., 2002: Methods for measuring height and planimetry discrepancies in airborne laserscanner data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 68, No. 9, pp. 933-940
24. Maas, H.-G., 2003: Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data - User requirements and system performance. *Proceedings 49. Photogrammetric Week (Ed. D. Fritsch)*, Wichmann Verlag
25. Murtagh, J., Foote, M., 1999: A practical application of laserscanning in the insurance industry. *Proceedings of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference, Ottawa, 21.-24.6.99, Vol. I*, pp. 582-588
26. Murtagh, J., 2001: Lasermapping Experiences at Infoterra: Three-Dimensional Mapping from InSAR and Lidar. *Workshop 'Three-Dimensional Mapping from InSAR and LIDAR'*, Banff, Canada
27. Naesset, E., 1997: Estimating Timber Volume of Forest Stands Using Airborne Laser Scanner Data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 61, No. 2, Pages 246-253
28. Petzold, B., Reiss, P., Stössel, W., 1999: Laser scanning - surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, Vol. 54, pp. 95-104
29. Rottensteiner, F., Briese, C., 2002: A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data - *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.34, Part 3A, pp.295-301
30. Schardt, M., Ziegler, M., Wimmer, A., Wack, R., Hyypä, J., 2002: Assessment of Forest Parameters by Means of Laser Scanning. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 34-3A*, p. 302ff
31. Schwalbe, E., Hofmann, A., Maas, H.-G., 2004: Gebäudemodellierung in reduzierten Parameteräumen von Airborne Laserscannerdaten. *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation 4/2004*
32. Vosselman, G. 1999. Building reconstruction using planar faces in very high density height data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, Part 3-2W5, pp. 87-92
33. Vosselman, G., 2000: Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part B3
34. Vosselman, G., Dijkman, S., 2001: 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans - *ISPRS International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34, Part 3W4, pp. 37-44
35. Wouters, W., Bollweg, A., 1998: A detailed elevation model using airborne laser altimetry. *Geodetic Info Magazine 9/98*