

Erfassung von räumlichen Daten in multiplen Dimensionen – topographisches LiDAR

Martin Rutzinger, Magnus Bremer, Rudolf Sailer und Johann Stötter

Zusammenfassung

In den letzten Jahren stieg die Bedeutung räumlicher Information nicht nur in den Bereichen Forschung, Wissenschaft und öffentlicher Verwaltung, sondern auch für alltägliche Anwendungen. Durch neue Entwicklungen in der Sensortechnologie ermöglicht die Fernerkundung die Erfassung von geographischen Daten in zunehmend höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung. Dies eröffnet zum einen neue Möglichkeiten in der Auswertung, Analyse und Anwendung solcher Daten, andererseits werden jedoch auch neue Anforderungen von themenspezifischen Anwendungen an die Datenerfassung gestellt. Ziel der Forschungen in der LiDAR Research Group des Instituts für Geographie an der Universität Innsbruck ist die Entwicklung und Anwendung von Methoden für die Analyse neuer Fernerkundungsdaten und Geoinformation zur Detektion, Kartierung und Quantifizierung von geographischen Phänomenen und Objekten im Natur- und Kulturräum. Ein Hauptaugenmerk liegt in der Erforschung des Potenzials der topographischen Information von Laserscanningdaten für die dreidimensionale Kartierung, das Monitoring von zeitlichen Veränderungen und die Modellierung von Prozessen in verschiedenen Maßstabsebenen. Im vorliegenden Beitrag wird ein Überblick über die Grundprinzipien der Abstraktion von realen Objekten zu digitalen 3D-Objekten aus Laserscanningdaten gegeben. An ausgewählten Beispielen werden konkrete Anwendungen für die Zivilgesellschaft gezeigt.

Einführung

Fernerkundung ist die Wissenschaft der berührungslosen Beobachtung, Analyse und Quantifizierung von Oberflächen und Objekten durch die Aufnahme von emittierter und reflektierter elektromagnetischer Strahlung über Sensoren. Die wohl anschaulichste Weise, wie Fernerkundung betrieben werden kann, ist der Fotoapparat bzw. die Digitalkamera. Dabei wird die an Objekten reflektierte Sonnenstrahlung von einem Sensor detektiert und in ein Foto umgesetzt. Fernerkundung wird zur Erfassung von räumlichen Daten z.B. zur Analyse von Meeresoberflächen, Vegetationsstrukturen, geomorphologischen Prozessen oder der Kartierung von Siedlungsräumen und Infrastruktur verwendet. Fernerkundung kann mittels Sensoren auf verschiedenen Trägerplattformen betrieben werden. Man unterscheidet terrestrische, bodennahe, flugzeug- oder helikoptergestützte sowie satellitengestützte Fernerkundungssysteme. Je nach Anwendung bieten die jeweiligen Trägerplattformen Vor- und Nachteile. Im Allgemeinen gilt, dass mit größerer Flughöhe die Größe des beobachtbaren Ausschnitts zunimmt, wobei gleichzeitig die räumliche Auflösung der aufgenommenen Daten abnimmt (Abb. 1). Um eine größere Gebietsabdeckung zu erhalten, werden Aufnahmen bei terrestrischen Trägerplattformen von verschiedenen Standorten, bei bodennahen und flugzeug- bzw. helikoptergestützten Trägerplattformen in Flugstreifen und bei Satellitenaufnahmen in definierten Umlaufbahnen um die Erde aufgenommen (Lillesand et al. 2003) (Abb. 2).



Abbildung 1: Trägerplattformen, Flughöhen und Auflösungen am Beispiel topographisches LiDAR

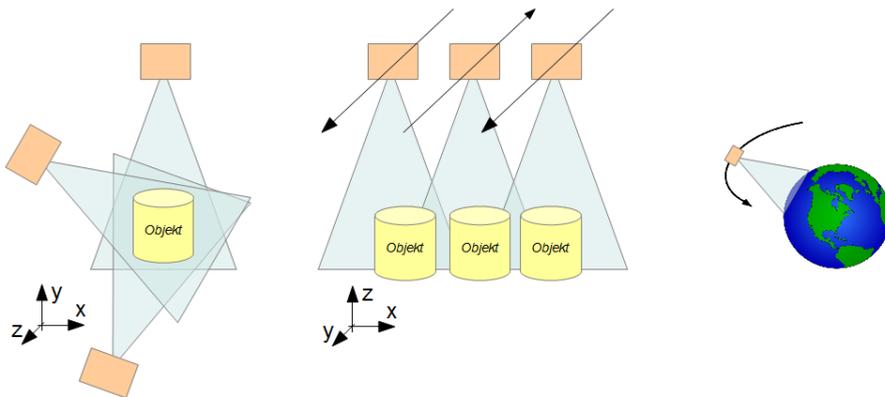


Abbildung 2: Aufnahme von verschiedenen Standorten bei terrestrischen Aufnahmen (links), Flugstreifen (Mitte) und Umlaufbahnen bei Satelliten (rechts) zur Abdeckung von größeren Gebieten

Grundsätzlich werden passive und aktive Fernerkundungssysteme unterschieden. Passive Systeme nutzen externe Energiequellen wie das Sonnenlicht (z.B. optische Sensoren wie ein Fotoapparat) oder die Wärmestrahlung von Körpern (z.B. Thermographie). Aktive Systeme besitzen eigene Energiequellen, die zum Beispiel Laserlicht (topographisches LiDAR, *Light Detection and Ranging*) oder Mikrowellen (RADAR, *Radio Detection and Ranging*) aussenden. Ein einfaches Beispiel für ein aktives System stellt ein Blitzlichtfoto dar. Der Vorteil von aktiven Systemen liegt darin, dass sie auch nachts und bei witterungsbedingt schlechter Sicht eingesetzt werden können. Darüber hinaus besitzen LiDAR- und RADAR-Systeme die Eigenschaft, dass z.B. Vegetation „durchdrungen“ werden kann und somit detaillierte Informationen über die Geländeeigenschaften unter Wald abgeleitet werden können (Albertz 2013).

So wie das menschliche Auge räumliche Realitäten in unterschiedlicher Dimensionalität wahrnehmen kann, sind auch durch Fernerkundungssensoren erfasste und ausgewertete geographische Daten der Erdoberfläche mehrdimensional. Je höher die Dimensionalität, desto komplexer und anspruchsvoller ist die Verarbeitung der jeweiligen geographischen Daten. Geometrisch betrachtet kann die Erdoberfläche zweidimensional (2D), pseudo-dreidimensional (2.5D) oder dreidimensional (3D) repräsentiert werden (Abb. 3). Die zeitliche Veränderung von räumlichen Phänomenen wird als vierte Dimension (4D) bezeichnet. Dabei ist zwischen sich bewegenden Objekten im Sinne von einem Verändern des Standorts von A nach B (z.B. fahrendes Auto) und ortsfesten Objekten, deren Oberfläche bzw. Volumen sich verändert (z.B. Ausbreitung des Waldes über mehrere Jahre, Abgang einer Rutschung), zu unterscheiden. Die Beobachtung von zeitlichen Veränderungen wird mittels Zeitreihenanalysen, *Tracking*-Methoden und *Change-Detection*-Analysen bewerkstelligt. Eine weitere Dimensionalität wird durch die radiometrischen und spektralen Sensoreigenschaften bestimmt. Sensoren nehmen elektromagnetische Strahlung in einem definierten Wellenlängenbereich auf. Dabei können verschiedene Wellenlängenbereiche in mehreren Farbbändern bzw. -kanälen abgespeichert werden. Bei optischen Sensoren können es z.B. drei Farbbänder im sichtbaren Wellenlängenbereich (Rot, Grün, Blau) sein. Schließlich gibt es noch eine semantische Dimensionalität, die durch die Klassifikation von Fernerkundungsdaten in benennbare, abgegrenzte Objekte bzw. Objektklassen erzeugt

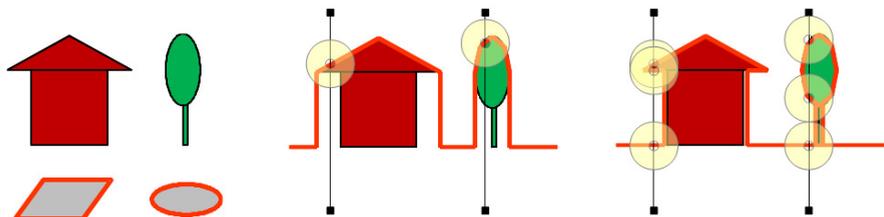


Abbildung 3: Geometrische Dimensionalität von geographischen Daten
(links: zweidimensional, 2D; Mitte: pseudo-dreidimensional, 2.5D; rechts: dreidimensional, 3D)

wird. Je nach Maßstabebene einer Auswertung kann es sich auch um mehrere semantische Hierarchiestufen zur Bezeichnung eines Phänomens oder Objekts handeln. So kann zum Beispiel ein Waldbestand klassifiziert werden, der sich aus verschiedenen Baumarten und weiters aus einzelnen Bäumen zusammensetzt. Ein Laubbaum kann weiter differenziert werden in Belaubung, Baumkrone und Stamm. Somit hätte die hier beschriebene semantische Dimension vier Hierarchiestufen.

Für thematische Anwendungen ist die Auflösung von geographischen Daten entscheidend. Dabei wird zwischen räumlicher bzw. geometrischer Auflösung (kleinstes abbildbares Objekt), zeitlicher Auflösung (zeitlicher Abstand zwischen wiederholten Aufnahmen an derselben Stelle), radiometrischer Auflösung (Anzahl der maximal möglichen aufgenommenen Grauwerte) und spektraler Auflösung (Anzahl und Charakteristik der Farbbänder bzw. -kanäle) unterschieden. Panchromatische Aufnahmen besitzen einen Farbkanal (Grauwertebild), multispektrale Aufnahmen bestehen zum Beispiel aus drei Farbkanälen im sichtbaren Bereich (Rot, Grün und Blau) und einem Farbkanal im nahen Infrarot, und hyperspektrale Aufnahmen besitzen mehrere bis zu hunderte Farbkanäle (Lillesand et al. 2004).

Topographisches LiDAR

Topographisches LiDAR ist ein aktives Fernerkundungsverfahren, bei dem LASER-Licht (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) ausgesendet wird und das primär zur Erfassung von hochauflösenden, die Raumausstattung eines Geländes repräsentierenden Geometriedaten verwendet wird. Je nach System werden Entfernungen von Einzelpunkten gemessen (*Laser Ranging*), Profilschnitte aufgenommen (*Laser Profiling*) oder Daten flächhaft aufgenommen (*Laser Scanning*). Ein Laserscanner zeichnet zwei Parameter auf, nämlich die Entfernung (*Range*) und den Scanwinkel. Die Entfernung wird aus der Messung der benötigten Laufzeit des Laserlichts zwischen Aussendezeitpunkt, Reflexion durch Rückstreuung an der Erdoberfläche und Detektion am Sensor bestimmt (Formel 1).

Formel 1:
$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

R... Range (Entfernung vom Sensor zum Objekt) [m]

c... Geschwindigkeit des Laserlichts [m/s]

t... Laufzeit vom Aussendezeitpunkt des Laserimpulses bis zur Detektion des Laserechos nach der Rückstreuung am Objekt [s]

Ein flugzeuggestütztes Laserscanningsystem (*Airborne Laser Scanning*, ALS) besteht aus einer Lasereinheit, einem differenziellen Globalen Positionierungssystem (dGPS) und einer inertialen Messeinheit (IMU). Die Lasereinheit sendet den Laserimpuls aus und detektiert das zurückkommende Signal (Echo, Return). Zu jeder Entfernungsmessung wird der Aussendewinkel des Laserpulses (Scanwinkel) relativ zur Trägerplattform bestimmt. Aus Entfernung und Scanwinkel werden die relativen Koordinaten eines getroffenen Punktes in Bezug zur Trägerplattform berechnet. Das dGPS bestimmt die absolute Position der Trägerplattform (z.B.

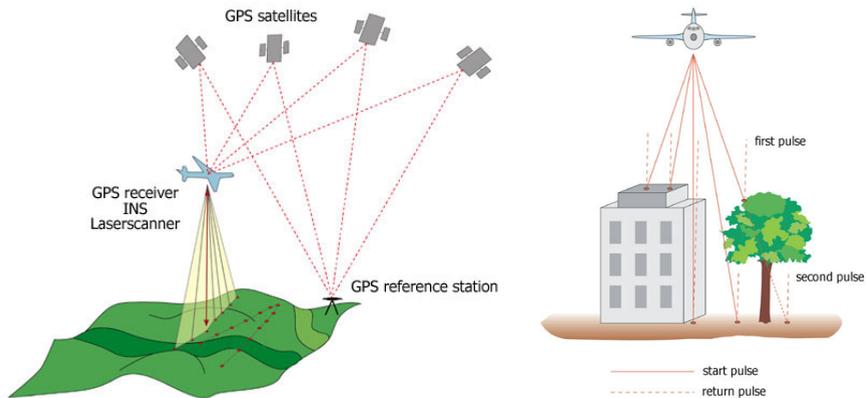


Abbildung 4: Messprinzip des flugzeuggestützten Laserscannings (Terra Imaging, 2013)

des Flugzeugs) bzw. der Lasereinheit im Raum. Die IMU misst die Winkel, die die Abweichung des Flugzeugs bzw. der Lasereinheit vom definierten Raumvektor der geplanten Flugbahn beschreiben (Nicken, Rollen, Driften). Durch die Kombination dieser drei Komponenten wird die absolute Koordinate eines Laserechos auf der Erdoberfläche bestimmt. Für den Spezialfall des bodengestützten bzw. terrestrischen Laserscannings (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS) verfügt das System nur über eine Lasereinheit, die auf einem Dreibein montiert wird. Hier müssen einzelne Aufnahmen auf Basis von manuellen dGPS-Messungen von Passpunkten registriert und geo-referenziert werden (Pfeifer und Briese 2007).

Wenn der Lichtkegel des ausgesandten Laserimpulses nur auf eine Teilfläche eines Objekts trifft (z.B. bei Dachkanten von Gebäuden oder Ästen von Bäumen), wird auch nur ein Teil des Laserlichts als Echo zurückgestreut (Abb. 4). Der andere Teil wandert weiter und wird erst später z.B. am Boden zurückgestreut. Die meisten operationell eingesetzten Systeme können bis zu vier Laserechos pro ausgesandtem Laserimpuls aufzeichnen. Dieser Effekt spielt vor allem bei Waldflächen eine entscheidende Rolle, weil die Laserimpulse durch kleine Lücken im Kronendach die Erdoberfläche erreichen können, sodass hochauflösende Geländemodelle unter Waldbeständen abgeleitet werden können. Im Vergleich zu bisherigen photogrammetrischen Methoden ist dies eine wesentliche Innovation (Vosselman und Maas 2010).

Das Ergebnis einer Laserscanningmessung ist eine dreidimensionale Punktwolke bestehend aus den Koordinaten der rückgestreuten Echos und einem Intensitätswert, die Stärke der Reflexion widerspiegelt. Die Intensitätswerte sind stark von den Aufnahmeparametern abhängig (Flughöhe, Einfallswinkel, meteorologische Bedingungen der Atmosphäre) und müssen deshalb für die Weiterverwendung scan- bzw. streifenweise korrigiert werden (Höfle und Pfeifer 2007).

Die Laserscanningpunktwolke ist nach Registrierung und Georeferenzierung das primäre Endprodukt einer Laserscanningmessung und entspricht dem Datensatz mit der höchsten räumli-

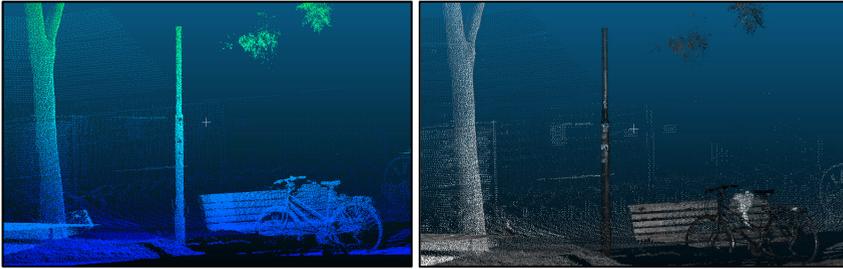


Abbildung 5: Das Ergebnis einer Laserscanningmessung ist eine dreidimensionale Punktwolke (links: eingefärbt nach Höhe, rechts eingefärbt nach Intensität)

chen Auflösung (Abb. 5). In einem ersten Prozessierungsschritt wird die Punktwolke klassifiziert und die Bodenpunkte (Geländepunkte) von Objektpunkten (z.B. Gebäude, hohe Vegetation) getrennt (Abb. 6). Die Verarbeitung und Analyse von 3D Daten ist sehr aufwändig und komplex. Es gibt noch relativ wenig standardisierte Softwareprodukte, die direkt mit hochauflösenden 3D-Punktwolken arbeiten können. Meist werden in weiteren Verarbeitungsschritten die Daten rasterisiert und damit in eine 2.5D-Datenrepräsentation überführt, damit die Laserdaten einfach in Geographische Informationssysteme (GIS) integriert und mit bestehenden geographischen Daten weiterverarbeitet werden können.

Bathymetrische Lasersysteme können unter klaren und ruhigen Bedingungen Wasser durchdringen und damit Wassertiefen entlang von Küstengewässern, in Seen oder Flussläufen messen. Dazu werden Lasersysteme mit zwei Laserquellen verwendet. Ein Laserstrahl im roten Wellenlängenbereich reflektiert an der Wasseroberfläche und misst die exakte Flughöhe, und ein Laserstrahl im grünen Wellenlängenbereich misst die Wassertiefe. Die messbaren Tiefen sind aufgrund der optischen Wassereigenschaften und -trübung begrenzt (Irish und White 1998, Doneus et al. 2013).

Anwendungen

Die Anwendungen von Laserscanningdaten sind vielfältig und reichen von der Erstellung von virtuellen 3D-Modellen, Planungsgrundlagen bei Infrastruktur- und Bauprojekten, forstwirtschaftlicher Inventurparameterableitung und Naturgefahrenmodellierung bis zur Gletschervermessung.

Forstwirtschaft: Aufgrund der beschriebenen Eigenschaften der LiDAR-Technologie bei hoher Vegetation und Waldflächen wird sie zur flächendeckenden Erfassung forstlicher Parameter wie Baumhöhe, Bestandsdichte und Überschirmungsgrad verwendet (Hyypä et al. 2008). So kann beispielsweise der Überschirmungsgrad innerhalb eines Waldbestandes nach automatischer Datenklassifikation und Einzelbaumableitung vollständig datengetrieben abgeleitet werden (Eysn et al. 2012). Dies ermöglicht eine objektive Bestimmung der Waldgrenze und somit ein verlässliches Monitoring ihrer Veränderung bei Analyse von multitemporalen

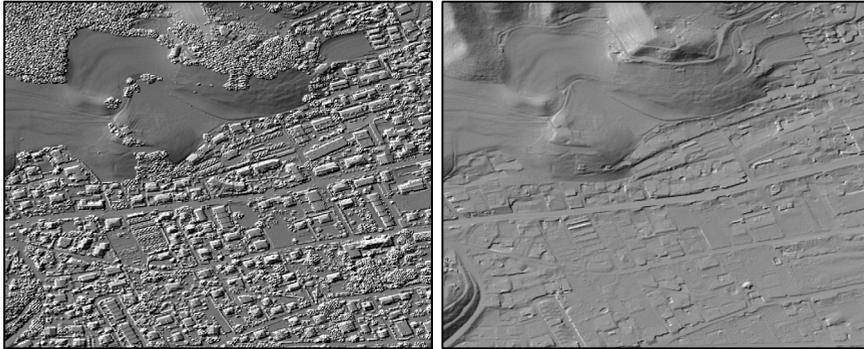


Abbildung 6: Digitales Oberflächenmodell und Geländemodell aus flugzeuggestützten Laserscanningdaten (Land Tirol, 2013)

Datensätzen. Neben den angeführten Parametern werden auch Holzvorrat und oberirdische Biomasse aus statistischen Punktverteilungen abgeleitet (Hollaus et al. 2009, Jochem et al. 2011). Zur Kalibrierung der genannten Methoden bietet das TLS zudem die Möglichkeit zu einer detaillierten Ableitung von Baumarchitekturen, die ein genaues Abschätzen von Holzvorrat und Biomasse auf Plot-Basis zulassen (Bremer et al. 2013).

Glaziologie, Geomorphologie und Naturgefahren im Hochgebirge: Aufgrund der hohen Detailgenauigkeit und der großen Gebietsabdeckung eignen sich ALS-Daten für die Erstellung geodätischer Gletschermassenbilanzen (Geist & Stötter 2009) sowie zur Klassifikation von Schnee, Firn und Eisflächen (Höfle et al. 2007) sowie zur Detektion und Analyse von Objekten wie z.B. Gletscherspalten (Kodde et al. 2007) oder Toteis in Gletschnähe (Sailer et al. 2012). In diesem Zusammenhang ist die Analyse von Genauigkeiten und Fehlerraten und die Entwicklung von Workflows für punkt- und rasterorientierte glaziologische Anwendungen Grundlage für operationelle Anwendungen (Bollmann et al. 2011; Sailer et al. 2012). Neben Gletschern, die auch im Gelände gut sichtbar auf Änderungen im Klimasystem reagieren, sind Laserscanningdaten geeignet, um Veränderungen im Hochgebirge, die durch geomorphologische Prozesse (z.B. Steinschlag, Felssturz, Mure) verursacht sind, großflächig zu detektieren und zu quantifizieren (Sailer et al. 2012, Zieher et al. 2012). TLS und ALS liefern auch Datengrundlagen für die Detektion und das Monitoring von Erosionsflächen und Rutschungen, z.B. für die Quantifizierung von Flächen- und Volumsänderungen (Metternicht et al. 2005, Jaboyedoff et al. 2012). Im Themenfeld Permafrostforschung werden multitemporale ALS-Daten zur Messung von Oberflächengeschwindigkeiten und Massenveränderungen von Blockgletschern verwendet (Bollmann et al. 2012; Klug et al. 2012). Erste praktische Anwendungen beim Umgang mit Naturgefahren machten sich das Potenzial von Laserscanningdaten zunutze, sodass durch das teilweise Durchdringen von Bergwald erstmals hochaufgelöste Geländemodelle für bisher nicht erfassbare Bereiche verfügbar wurden (Belitz et al. 1996; Maukisch et al. 1996a, 1996b). Dadurch konnten neue Erkenntnisse über die vom Gelände abhängigen Rahmenbedingungen zur Entstehung sowie zum Verlauf von Lawinen gewonnen werden. Neben

Anwendung zur verbesserten Modellierung von Lawinen aus ALS-Daten kommt heute insbesondere TLS zum Monitoring der winterlichen Schneedecke zum Einsatz (Jörg et al. 2006, Schaffhauser et al. 2008, Prokop et al. 2008). Die daraus abgeleiteten Ergebnisse lassen eine Massenbilanzierung von Lawinen zu, die ihrerseits wiederum zur Verbesserung von Lawinensimulationsmodellen beitragen (Sailer et al. 2008). Einen umfassenden Überblick über Anwendungen von topographischem LiDAR im Bereich Geomorphologie geben Höfle und Rutzinger (2011). Spezielle Anwendungen in der Naturgefahrenforschung beschreiben Geist et al. (2009).

Urbane Räume: In urbanen Räumen spielt die Ableitung von 3D-Stadtmodellen auf Basis von LIDAR-Daten mittlerweile eine wichtige Rolle. Mittels spezieller Segmentierungs- und Klassifizierungsverfahren lassen sich semantische Gruppen direkt aus der 3D-Punktwolke ableiten. Diese ermöglichen die Rekonstruktion und Modellierung komplexer Gebäude und die Einteilung in Einzelgebäude sowie Dach-, Fassadenflächen und Aufbauten (Oude Elberink und Vosselman 2011, Pu und Vosselman 2009). Die so erzeugten Modelle sind für detaillierte GIS-Abfragen, planerische Anwendungen sowie komplexe 3D-Visualisierungen verwendbar. In Kombination mit einem ebenfalls aus LiDAR-Daten abgeleiteten digitalen Geländemodell lässt sich die Sonnenstrahlungssituation für einzelne Gebäudeobjekte räumlich hochaufgelöst modellieren, aus der Planungsempfehlungen für die Einrichtung von Photovoltaic und Solarthermieanlagen ausgearbeitet werden (Jochem et al. 2009, Jochem et al. 2012). Ähnliche Modellierungen erfordert die Planung von Mobilfunkmasten oder die Simulation von mikroklimatischen Bedingungen (Brenner 2010). Mobile Laserscanningaufnahmen (*Mobile Laser Scanning*, MLS) werden v.a. für die Inventarisierung von Verkehrsflächen (Pu et al. 2011) und die Rekonstruktion von Gebäudefassaden verwendet (Rutzinger et al. 2011).

Aktuelle Entwicklungen

Neue Entwicklungen in der Sensortechnologie von Lasersystemen ermöglichen die Aufzeichnung der gesamten Wellenform der zurückgestreuten Energie. Das sogenannte Full-Waveform (FWF) Laserscanning liefert somit zusätzliche Information über die radiometrischen Eigenschaften von gescannten Objekten und Oberflächen und erlaubt somit eine umfassendere Differenzierung und Analyse von Oberflächenrauigkeiten und Vegetationsstrukturen (Mallet und Bretar 2009, Höfle et al. 2012).

In letzter Zeit finden unbemannte Flugobjekte (*Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) mediale Betrachtung. Der Vorteil von UAVs ist die flexible Einsetzbarkeit und die Abdeckung des Maßstabsbereichs zwischen den kleinräumigen Anwendungen von terrestrischen und großflächigen Einsatzmöglichkeiten flugzeuggestützter Trägerplattformen. Bisher waren Laserscannersysteme zu schwer für den Einsatz auf UAVs. Einige Forschergruppen arbeiten jedoch an UAVs mit Lasersensoren, sodass zu erwarten ist, dass auch diese Trägerplattformen in naher Zukunft standardmäßig für die Laserdatenerfassung zur Verfügung stehen werden (Wallace et al. 2012).

Bisher liefern operationelle Lasersysteme monochromatische Intensitätsbilder. Da es jedoch Lasersensoren gibt, die in verschiedenen Wellenlängen operieren, kann bei Kombination dieser Sensoren auch multispektrales Laserscanning betrieben werden. Diese Art des Laserscannings wird in Zukunft die Geländefilterung, Oberflächen- und Objektklassifikation revolutionieren (Briese et al. 2012, Pfennigbauer und Ullrich 2011).

Generell ist eine vermehrte Verfügbarkeit von flächendeckenden topographischen LiDAR-Datensätzen zu beobachten. Im Zusammenhang mit den *Open-Data*-Strategien der öffentlichen Verwaltungen werden diese Datensätze vermehrt verfügbar. Die mit jeder neuen Sensorgeneration steigenden Datenmengen stellen das Datenmanagement und die automatisierte flächendeckende Datenauswertung vor ständig neue Herausforderungen, insbesondere dann, wenn die hochaufgelöste 3D-Information der erfassten LiDAR-Punktwolke in Wert gesetzt werden soll.

Fazit

Topographisches LiDAR ist ein aktives Fernerkundungssystem das die Erfassung von dreidimensionalen Daten bei Tag und Nacht bzw. auch bei Schlechtwetter ermöglicht. LiDAR-Systeme sind auf verschiedenen Trägerplattformen verfügbar, was eine anwendungsorientierte Datenerfassung ermöglicht. Die Genauigkeit der erfassten Daten liegt im dm-cm- (ALS) bzw. im cm-mm- (TLS) Bereich. Der wohl bedeutendste Unterschied zu herkömmlichen optischen Fernerkundungssystemen bzw. klassischen photogrammetrischen Auswertungen ist die Eigenschaft, dass topographisches LiDAR die hohe Vegetationsbedeckung durchdringen kann und eine detaillierte Aufnahme des Geländes somit flächendeckend ermöglicht wird. Damit leistet diese Technologie einen wesentlichen Beitrag für die hochgenaue dreidimensionale Erfassung von räumlichen Daten für ein breites Anwendungsspektrum.

Literatur

- Albertz, J. (2013): *Einführung in die Fernerkundung*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Belitz, K., Frisch, U., Maukisch, M., Stötter, J., Wilhelm, F., Konetschny, H., Stempel, K. & Zenke, B. (1996): Laser-Scanning – ein neuartiges Verfahren zur Erstellung hochgenauer und hochauflösender digitaler Geländemodelle. *Interpraevent 4*. Klagenfurt, S. 15–25.
- Bollmann, E.; Abermann, J.; Klug, C.; Sailer, R. & Stötter, J. (2012): Quantifying rockglacier creep using airborne laserscanning – a case study from two rockglaciers in the Austrian Alps. In: Hinkel, M. K. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost*. Salekhard, S. 49–54.
- Bollmann, E.; Sailer, R.; Briese, C.; Stötter, J. & Fritzmann, P. (2011): Potential of airborne laser scanning for geomorphologic feature and process detection and quantifications in high alpine mountains. *Zeitschrift für Geomorphologie 55* (2), S. 83–104.
- Bremer, M., Rutzinger, M. & Wichmann, V. (2013): Derivation of tree skeletons and error assessment using LiDAR point cloud data of varying quality. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 80*, S. 39–50.
- Brenner, C. (2010): Building Extraction. In: Vosselman, G. & Maas, H.-G. (Hrsg.): *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Boca Raton: Whittles Publishing, S. 169–212.
- Briese, C.; Pfennigbauer, M.; Lehner, H.; Ullrich, A.; Wagner, W. & Pfeifer, N. (2012): Radiometric Calibration of multi-wavelength Airborne Laser Scanning Data. In: Shortis, M., Wagner, W. & Hyypä, J. (Hrsg.): *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Melbourne: Cobernicus, S. 335–340.
- Doneus, M.; Noneus, N.; Briese, C.; Pregesbauer, M.; Mandlbürger, G. & Verhoeven, G. (2013): Airborne laser bathymetry – detecting and recording submerged archaeological sites from the air. *Journal of Archaeological Science 40* (4), S. 2136–2151.
- Eysn, L.; Hollaus, M.; Schadauer, K. & Pfeifer, N. (2012): Forest delineation based on airborne LiDAR data. *Remote Sensing 4* (3), S. 762–783.
- Geist, T.; Höfle, B.; Rutzinger, M. & Stötter, J. (2005): Der Einsatz von flugzeuggestützten Laserscanner Daten für geowissenschaftliche Untersuchungen in Gebirgsräumen. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 3*, S. 183–190.
- Geist, T.; Höfle, B.; Rutzinger, M.; Pfeifer, N. & Stötter (2009): Laser Scanning – a paradigm change in topographic data acquisition for natural hazard management. In: Veulliet, E., Stötter, J. & Weck-Hannemann, H. (Hrsg.): *Sustainable Natural Hazard Management in Alpine Environments*. Berlin: Springer, S. 309–339.

- Geist, T. & Stötter, J. (2009): Airborne Laser Scanning in Glacier Studies. In: Pellika, P. & Rees, W., G. (Hrsg.): *Remote Sensing of Glaciers: Techniques for Topographic, Spatial and Thematic Mapping of Glaciers*. London: Taylor & Francis, S. 179–194.
- Höfle, B. & Pfeifer, N. (2007): Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 62 (6), S. 415–433.
- Höfle, B. & Rutzinger, M. (2011): Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. *Zeitschrift für Geomorphologie* 55 (2), S. 1–29.
- Höfle, B., Geist, T., Rutzinger, M. & Pfeifer, N. (2007): Glacier surface segmentation using airborne laser scanning point cloud and intensity data. In: Rönnholm, P., Hyypä, H. & Hyypä J. (Hrsg.): *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36-3/W52. Espoo: ISPRS, S. 195–200.
- Höfle, B.; Hollaus, M. & Hagenauer, J. (2012): Urban vegetation detection using radiometrically calibrated small-footprint full-waveform airborne LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67, S. 134–147.
- Hollaus, M.; Wagner, W.; Schadauer, K.; Maier, B. & Gabler, K. (2009): Growing stock estimation for alpine forests in Austria: a robust lidar-based approach. *Canadian Journal of Forest Research* 39, S. 1387–1400.
- Hyypä, J.; Hyypä, H.; Leckie, D.; Gougeon, F.; Yu, X. & Maltamo, M. (2008): Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5), S. 1339–1366.
- Irish, J. L. & White, T.E. (1998): Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry. *Coastal Engineering* 35 (1-2), S. 47-71.
- Jaboyedoff, M.; Oppikofer, T.; Abellan, A.; Derron, M.-H.; Loye, A.; Metzger, R. & Pedrazzini, A. (2010): Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards* 61 (1), S. 5–28.
- Jochem, A.; Höfle, B.; Rutzinger, M. & Pfeifer, N. (2009): Automatic roof plane detection and analysis in airborne LIDAR point clouds for solar potential assessment. *Sensors* 9 (7), S. 5241–5262.
- Jochem, A.; Höfle, B.; Wichmann, V.; Rutzinger, M. & Zipf, A. (2012): Area-wide roof plane segmentation in airborne LiDAR point clouds. *Computers, Environment and Urban Systems* 36 (1), S. 54–64.
- Jochem, A.; Hollaus, M.; Rutzinger, M. & Höfle, B. (2011) Estimation of aboveground biomass in alpine forests: a semi-empirical approach considering canopy transparency derived from airborne LiDAR data. *Sensors* 11 (1), S. 278–295.

- Jörg, P.; Fromm, R.; Sailer, R. & Schaffhauser, A. (2006): Measuring snow depth with a Terrestrial Laser Ranging System. In: *Proceedings of the 2006 International Snow Science Workshop*. Telluride, S. 452–460.
- Klug, C.; Bollmann, E.; Käab, A.; Krainer, K.; Sailer, R. & Stötter, J. (2012): Monitoring of permafrost creep on two rock glaciers in the Austrian eastern Alps: Combination of aerophotogrammetry and airborne laser scanning. In: Hinkel, M. K. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost*. Salekhard, S. 215–226.
- Kodde, M., P.; Pfeifer, N.; Gorte, B., G.; Geist, T. & Höfle, B. (2007): Automatic glacier surface analysis from airborne laser scanning. In: Rönnholm, P., Hyypä, H. & Hyypä J. (Hrsg.): *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36-3/W52. Espoo: ISPRS, S. 221–226.
- Land Tirol (2013): *Frei verfügbarer Schummerungs-WMS von Tirol*. Abgerufen unter: <http://www.tirol.gv.at/themen/sicherheit/geoinformation/laserscanning/> [Stand vom 31-03-2013]
- Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. & Chipman, J.W. (2004): *Remote Sensing and Image Interpretation*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Mallet, C. & Bretar, F. (2009): Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (1), S. 1–16.
- Maukisch, M., Belitz, K., Frisch, U., Stötter, J., Wilhelm, F., Konetschny, H., Stempel, K. & Zenke, B. (1996a): Vergleich digitaler Geländemodelle als Grundlage für Naturraumanalysen. *Interpraevent* 4. Klagenfurt, S. 51–61.
- Maukisch, M., Belitz, K., Frisch, U., Stötter, J., Wilhelm, F., Stempel, K. & Zenke, B. (1996b): Konzept zur Erfassung und Bewertung von Strukturen im Bergwaldbereich als Grundlage für das Verständnis der Lawinengeneese. *Interpraevent* 2. Klagenfurt, S. 103–112.
- Metternicht, G.; Hurni, L. & Gogu, R. (2005): Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment* 98, S. 284–303.
- Oude Elberink, S. & Vosselman, G. (2011): Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (2), S. 157–165.
- Pfeifer, N. & Briese, C. (2007): Laser scanning – Principles and Applications. In: *Geo-Sibir, 3rd International Scientific Conference*. Novosibirsk: SSGA, S. 93–112.
- Pfennigbauer, M. & Ullrich, A. (2011), Multi-Wavelength Airborne Laser Scanning. In: *International LiDAR Mapping Forum 2011*. New Orleans, S. 7–9.

- Prokop, A.; Schirmer, M.; Lehning, M. & Stocker, M. (2008): A comparison of measurement methods: Terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing, for the determination of spatial snow depth distribution on slopes. *Annals of Glaciology* 49, S. 210–216.
- Pu, S. & Vosselman, G. (2009): Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (6), S. 575–584.
- Pu, S.; Rutzinger, M.; Oude Elberink, S. & Vosselman, G. (2011): Recognizing structures from mobile laser scanning data for road inventory studies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (6), S. 28–39.
- Rutzinger, M.; Höfle, B.; Oude Elberink, S. & Vosselman, G. (2011): Feasibility of facade footprint extraction from mobile laser scanning data. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 3 (3), S. 97–107.
- Sailer, R.; Bollmann, E.; Hoinkes, S.; Rieg, L.; Sproß, M. & Stötter, J. (2012): Quantification of geomorphodynamic processes in glaciated and recently deglaciated terrain based on airborne laser scanning data. *Geographiska Annaler: Series A, Physical Geography* 94, S. 17–32.
- Sailer, R.; Fellin, W.; Fromm, R.; Jörg, P.; Rammer, L.; Sampl, P. & Schaffhauser, A. (2008): Snow avalanche mass-balance calculation and simulation-model verification. *Annals of Glaciology* 48, S. 183–192.
- Schaffhauser, A.; Fromm, R.; Joerg, P.; Luzi, G.; Noferini, L. & Sailer, R. (2008): Remote sensing based retrieval of snow cover properties. *Cold Regions Science and Technology* 54, S. 164–175.
- Terra Imaging (2013): *Laser scanning – How it works*. Abgerufen unter: <http://www.terraimaging.de/index.php/en/technologie/laserscanning> [Stand vom 31-03-2013]
- Vosselman, G. & Maas, H.-G. (Hrsg.) (2010): *Airborne and terrestrial laser scanning*. Caithness: Whittles Publishing.
- Wallace, A.M.; Watson, C. & Turner, D. (2013): Development of a UAV-LiDAR System with application to Forest Inventory. *Remote Sensing* 4 (6), S. 1519–1543.
- Zieher, T.; Formanek, T.; Bremer, M.; Meißl, G. & Rutzinger, M. (2012): Digital terrain model resolution and its influence on estimating the extent of rockfall areas. *Transactions in GIS* 16 (5), S. 691–699.