

Potenziale des Full-Waveform-Laserscanning zur Erfassung von Flussvorlandrauenheiten

Boris Jutzi

1 Einleitung

Die automatische Generierung von dreidimensionalen Modellen zur Beschreibung von natürlichen Objekten ist für unterschiedlichste Anwendungen von großem Interesse. Aktive Laser-scanner ermöglichen eine direkte, präzise und schnelle Erfassung der Entfernung von 3D-Objekten, unabhängig von den Beleuchtungsverhältnissen. Für die Aufnahme der Erdoberfläche durch flugzeuggetragene Systeme werden typischerweise gepulste Laser verwendet.

Die meisten Systeme sind in der Lage, mindestens die Entfernung des ersten und letzten rückgestreuten Pulses zu erfassen. Manche Systeme nehmen Entfernungswerte von mehreren rückgestreuten Pulsen auf, z. B. bis zu fünf Entfernungswerte pro gesendeten Puls. Die Detektion des ersten Pulses (*first pulse*) ist die optimale Wahl um die Hülle von teilweise durchdrungenen Objekten oder sogenannten Volumenstreuern (z. B. Baumkronen) zu messen. Die Detektion des letzten Pulses (*last pulse*) sollte gewählt werden, wenn nicht durchdringbare Flächen (z. B. Bodenflächen) gemessen werden sollen.

2 Full-Waveform-Laserscanning – ein Überblick

Im Gegensatz zur Messung charakteristischer Entfernungswerte ergeben sich bei der Aufnahme der kompletten zeitlichen Signalform (*engl. Full-Waveform*) neue Möglichkeiten der Auswertung (MALLET & BRETTAR 2009, STILLA et al. 2009).

Untersuchungen durch die Analyse der Signalform wurden zur Erforschung von Vegetation hinsichtlich der Biomasse oder Dichte des Bestandes (beispielsweise Bäume, Büsche und Untergrund) vorgenommen. Die NASA entwickelte einen Prototyp zur Aufzeichnung der Signalform mit dem Laser Vegetation Imaging Sensor (LVIS), womit ein vertikales Dichteprofil von Wäldern erfasst werden kann (BLAIR et al. 1999). Dieses luftgestützte Experimentalsystem wird in einer Höhe von bis zu 10 km eingesetzt und besitzt einen Durchmesser des Footprints von bis zu 80 m, der die Untersuchung von verschiedenen Landnutzungsklassen ermöglicht.

Das raumgestützte Geoscience Laser Altimeter System (GLAS), welches von dem Ice, Cloud and Land Elevation Satellite (ICESat) getragen wird, erfasst Höhenprofile von Wolken und Aerosolen, misst die Höhe von großflächigen Eis- und Landflächen und kann von großen

Gebieten die Vegetation vermessen. Hierfür wird ein Lasersystem mit einem Footprint-Durchmesser von 70 m eingesetzt, welches mit einer Dezimetergenauigkeit die Höhenunterschiede auf der Erde erfasst (HOFSEN et al. 2000).

Neben diesen Large-Footprint-Lasersystemen wurden die ersten Aufzeichnungen der Signalform von Small-Footprint-Lasersystemen durch den australischen Laser Airborne Depth Sounder (LADS) (PENNY et al. 1986) und das amerikanische Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey System (SHOALS) (LILLYCROP & BANIC 1993) für die Beobachtung in Küstenregionen entwickelt. Bei diesen Systemen ist, wegen der starken Streuung im Wasser, die Bodendetektion nur mittels Auswertung der Signalform möglich.

In letzter Zeit folgten weitere Entwicklungen zur Aufzeichnung der Signalform und derzeit sind mehrere kommerzielle luftgestützte Systeme (Tabelle 1) verfügbar: Optech ALTM 3100, TopEye Mark II und TopoSys Harrier 56. Das zuletzt genannte System basiert auf dem Riegl LMS-Q 560, dessen Nachfolger ist der Riegl LMS-Q 680. Diese Systeme operieren mit einem gesendeten Puls, der die zeitliche Länge von wenigen Nanosekunden aufweist.

Tabelle 1

Spezifikationen von Small-Footprint-Lasersystemen.

	RIEGL LMS-Q560	OPTECH ALTM 3100	TOPEYE II
Wellenlänge [nm]	1550	1064	1064
Pulslänge bei FWHM ^a [ns]	4	-	5
Pulswiederholrate [kHz]	200	50	50
Strahldivergenz [mrad]	≤ 0.5	0.3 or 0.8	1
Operationshöhe[m]	< 1500	< 2500	< 1000
Abtastwinkel [°]	± 22.5, ± 30	± 25	± 20

^a Full-width-at-half-maximum

Zur Interpretation der empfangenen Signalform des rückgestreuten Laserpulses ist das Verständnis für den physikalischen Hintergrund von der Laserstrahlungsausbreitung und die Oberflächeninteraktion relevant (JUTZI et al. 2002, WAGNER et al. 2003). Der Einfluss der beleuchteten Oberfläche auf die gesendete Signalform wurde von STEINVALL (2000) anhand von Objekten mit unterschiedlicher Oberflächenform und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Reflexionseigenschaften diskutiert. GARDNER (1982) und BUFTON (1989) untersuchten die zeitliche Pulsaufweitung durch die Beeinflussung von Oberflächenstrukturen, beispielsweise durch Oberflächenneigung und vertikaler Rauigkeit innerhalb des beleuchteten Gebiets.

Die Aufzeichnung der empfangenen Signalform eröffnet die Möglichkeit zur Verwendung verschiedener Methoden für die Entfernungsbestimmung. Die Entfernungsbestimmung kann prinzipiell verbessert werden durch die Berücksichtigung von der gesendeten und empfangenen Signalform, da die gemessene beziehungsweise a priori bekannte Signalform in die Analyse einfließt und die Formen miteinander verglichen werden können. Hierfür eignen sich besonders gut Signalverarbeitungsmethoden, beispielsweise Korrelation und Inversfilterung.

Die dadurch erreichte Genauigkeit der Entfernungsbestimmung ist im Allgemeinen höher als eine Entfernungsbestimmung, die nur auf der empfangenen Signalform basiert (JUTZI & STILLA 2006). Eine zusätzliche Verbesserung der Genauigkeit kann durch die Kleinst-Quadrat-Korrelation erreicht werden. Durch diese Methode können Entfernungswerte bestimmt werden, die zwischen dem zeitlichen Abtastraster liegen.

Charakteristische Merkmale zur Beschreibung der Oberfläche sind beispielsweise *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* die mit der *zeitlichen Position*, *Breite* und *Amplitude* der Signalform gemessen werden können. Die direkte Ableitung dieser Merkmale aus dem Signalverlauf führt jedoch aufgrund der gestörten Signalform auf nicht repräsentative Parameter. Unter der Annahme dass die Signalform $s(t)$ einen gaußförmigen Verlauf über der Zeit besitzt ergibt sich

$$s(t) = \frac{a}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}\right),$$

wobei die zu bestimmenden Parameter *mittlerer Zeitwert τ* , *Standardabweichung σ* und *maximale Amplitude* sind.

Die Oberflächenmerkmale haben direkten Einfluss auf die Amplitude und die Länge der empfangenen Signalform. Um für die Signalform eine Parameterbeschreibung zu erhalten, wird die Gaussian-Decomposition-Methode angewandt. Diese Methode hat sich zunehmend etabliert und wird als Standardauswertemöglichkeit der Signalform eingesetzt.

Heutzutage wird die Analyse der Signalform zunehmend in der Fernerkundung für Vermessungen in der Forstwirtschaft eingesetzt (HOLLAUS et al. 2011, MALLET et al. 2008, REIT-BERGER et al. 2009) und ist deswegen auch für Fluss- und Küstenbereiche von großer Bedeutung.

3 Beschreibung von Oberflächenstrukturen

Wie bereits im vorangegangen Abschnitt beschrieben können mit einem Lasersystem unterschiedliche Merkmale erfasst werden, z. B. *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke*. Jedes Merkmal kann idealerweise einer speziellen Oberflächenstruktur zugeordnet werden. Um Oberflächenstrukturen unterscheiden zu können, ist eine Einteilung in unterschiedliche *Rauigkeitsstufen* sinnvoll. Hierbei kann die Größe der angeleuchteten Oberflächengeometrie, bezogen auf den Durchmesser d und die Wellenlänge λ des Laserstrahls, als sinnvolles Unterscheidungsmaß eingesetzt werden, um die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen in MACRO-, MESO- und MICRO-Strukturen einzuteilen (Abb. 1).

MACRO-Strukturen

Mit MACRO-Strukturen werden Strukturen bezeichnet, deren Ausmaße die Größe des Strahldurchmessers d (Footprint) um ein Vielfaches übersteigt. Bei Lasersystemen sind die Strahldivergenz und die räumliche Abtastung aufeinander abgestimmt. Im Allgemeinen ist hierbei der Strahldurchmesser kleiner oder idealerweise gleich dem Abstand zwischen den Stützstellen. Die Entfernungswerte, die durch die räumliche Abtastung mit einem Lasersystem gemessen werden, ermöglichen die Rekonstruktion von großen Objektstrukturen (beispielsweise Geländetopografie, Dachformen von Gebäuden usw.).

Bei der Analyse von MACRO-Strukturen, die bei ausgedehnten Objekten mit einfacher Oberflächengeometrie auftreten, wird vorausgesetzt, dass eine einzelne Reflexion auftritt. Diskontinuitäten innerhalb der beleuchteten Oberflächengeometrie werden vernachlässigt. MACRO-Strukturen können durch das Merkmal *Entfernung* repräsentiert werden.

MESO-Strukturen

Mit MESO-Strukturen werden Strukturen bezeichnet, deren Ausmaße zwischen der Größe des Strahldurchmessers d und der Wellenlänge λ liegen. Unterschiedlich weit entfernte Objektbereiche innerhalb des Strahlengangs bewirken unterschiedliche Entfernungswerte innerhalb einer Messung. Dies kann verursacht werden durch die Beleuchtung von zwei, mehreren oder kontinuierlichen Bereichen mit geringer unterschiedlicher Entfernung (beispielsweise Schornstein, Gaube, Dachschräge, Dachgiebel, Äste, Blätter usw.).

Bei der Analyse von MESO-Strukturen können sowohl deterministische Diskontinuitäten durch „man-made“ Objekte als auch zufällige Diskontinuitäten durch natürliche Objekte für die beleuchtete Oberflächengeometrie angesetzt werden. MESO-Strukturen bewirken eine Deformation der gesendeten Signalform des rückgestreuten Laserpulses und die zeitliche Pulslänge der empfangenen Signalform wird vergrößert. Diese Variation in der Entfernung durch unterschiedliche Entfernungswerte kann als Merkmal *Entfernungsvariation* bezeichnet werden.

MICRO-Strukturen

Mit MICRO-Strukturen werden Strukturen bezeichnet, deren Ausmaße kleiner beziehungsweise gleich der Größenordnung der Wellenlänge λ sind. In Abhängigkeit von der Wellenlänge wird das Reflexionsvermögen der Oberfläche durch das Oberflächenmaterial beeinflusst. Das Reflexionsvermögen der Oberfläche kann als Reflexionsstärke durch ein Lasersystem bestimmt werden. Die Reflexionsstärke wird aus der Amplitude oder der Energie der empfangenen Signalform gemessen. Somit kann durch die Amplitude (Energie) auf das Material der Oberfläche geschlossen werden.

Bei der Analyse von MICRO-Strukturen ist das Reflexionsvermögen der beleuchteten Oberflächen relevant, um beispielsweise verschiedene Materialien zu unterscheiden. MICRO-Strukturen verändern die Amplitude der empfangenen Signalform des rückgestreuten Laserpulses, der Verlauf wird hierbei nicht verändert. Die Amplitude kann als Maß für das Merkmal *Reflexionsstärke* gesehen werden.

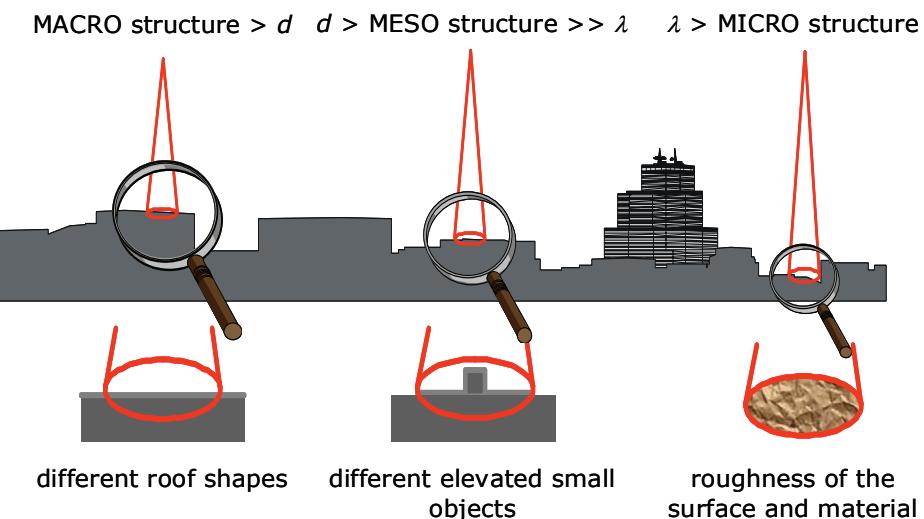


Abb. 1: Unterschiedliche Detaillierungsstufen, die mit einem Lasersystem erfasst werden können.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Full-Waveform-Laserscanning ist ein Messverfahren zur Erfassung von Oberflächenmerkmalen (z. B. *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke*) bzw. unterschiedlichen Detaillierungsstufen (z. B. MACRO-, MESO- und MICRO-Strukturen). Somit ist das Full-Waveform-Laserscanning mit seinen neuen geodätischen Messsystemen als Messmethode prädestiniert für die Erfassung von Rauheiten, beispielsweise Flussvorlandrauheiten. Aus den erfassten Full-Waveform-Laserscanning-Daten können Rauheitsgrößen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad extrahiert werden. Es ist erstrebenswert diese Rauheitsgrößen in hydraulisch relevante Modellierungswerte (z. B. Manning-Strickler-Beiwert) zu überführen. Hierfür ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Geodäten und Hydraulikern essenziell.

Literatur

- BLAIR, J. B., D. L. RABINE, M. A. HOFTON (1999): The Laser Vegetation Imaging Sensor (LVIS): A Medium-Altitude, Digitization-Only, Airborne Laser Altimeter for Mapping Vegetation and Topography. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (2-3): 112-122.
- BUFTON, J. L. (1989): Laser Altimetry Measurements from Aircraft and Spacecraft. Proceedings of the IEEE 77 (3): 463-477.
- GARDNER, C. S. (1982): Target Signatures for Laser Altimeters: An Analysis. Applied Optics 21 (3): 448-453.
- HOFTON, M. A., J. B. MINSTER, J. B. BLAIR (2000): Decomposition of Laser Altimeter Waveforms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 38 (4): 1989-1996.

- HOLLAUS, M., C. AUBRECHT, B. HÖFLE, K. STEINNOCHER, W. WAGNER (2011): Roughness Mapping on Various Vertical Scales Based on Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data. *Remote Sensing* 3(3), 503-523.
- JUTZI, B., B. EBERLE, U. STILLA (2002): Estimation and Measurement of Backscattered Signals from Pulsed Laser Radar. In: Serpico SB (Ed.) *Image and Signal Processing for Remote Sensing VIII*. SPIE Proceedings Vol. 4885: 256-267.
- JUTZI, B., U. STILLA (2006): Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 61 (2): 95-107.
- LILLYCROP, W. J., J. R. BANIC (1993): Advancements in the US Army Corps of Engineers Hydrographic Survey Capabilities: The SHOALS System. *Marine Geodesy*, Vol. 15: 177-185.
- MALLET, C., F. BRETAR (2009): Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 64 (1): 1-16.
- MALLET, C., F. BRETAR, U. SOERGEL (2008): Analysis of Full-Waveform Lidar Data for Classification of Urban areas. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation (PFG)*, Jahrgang 2008, Heft 5, 337-349.
- PENNY, M. F., R. H. ABBOT, D. M. PHILLIPS, B. BILLARD, D. REES, D. W. FAULKNER, D. G. CARTWRIGHT, B. WOODCOCK, G. J. PERRY, P. J. WILSEN, T. R. ADAMS, J. RICHARDS (1986): Airborne Laser Hydrography in Australia. *Applied Optics* 25 (13): 2046-2058.
- REITBERGER, J., P. KRZYSTEK, U. STILLA (2009): First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern. 29. Wissenschaftliche-Technische Jahrestagung der DGPF. 355-364.
- STEINVALL, O. (2000): Effects of Target Shape and Reflection on Laser Radar Cross Sections. *Applied Optics* 39 (24): 4381-4391.
- STILLA, U., B. JUTZI, J. REITBERGER, W. YAO, P. KRZYSTEK (2009): Full Waveform Laserscanning - Auswertemethoden und Anwendungen. *Terrestrisches Laserscanning (TLS2009)*, Schriftenreihe des DVW, Band 60: 49-67 (eingeladener Beitrag).
- WAGNER, W., A. ULLRICH, C. BRIESE (2003): Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*, VGI 4/2003: 223-235.



Kontakt:

Dr.-Ing. Boris Jutzi

Institut für Photogrammetrie
und Fernerkundung/
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstr. 12
76128 Karlsruhe
Tel: 0721/ 608 46993
Fax: 0721/ 608 48450
E-Mail: boris.jutzi@kit.edu

Ausbildung

1988 – 1996

Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Kaiserslautern

2007

Promotion zum Dr.-Ing. an der Technischen Universität München

Beruflicher Werdegang

1997 – 2009

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Optronik und Mustererkennung

(heute Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung)

seit 2009

Akademischer Rat auf Zeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
(ehemals Technische Universität Karlsruhe)