

Zur Messgenauigkeit der LIDAR-Technologie

Baumhöhenmessung mit flugzeuggetragenen Laserscannern

Von Marco Heurich, Stephan Günther, Sascha Schröder, Eckhard Kennel

Die Anwendung innovativer Technologien zur Erfassung von Waldstrukturen mithilfe von Fernerkundungssensoren erlangt im forstlichen Bereich immer größere Bedeutung. Gerade LIDAR (Light Detection And Ranging), in Europa eher bekannt als Laserscanning, bietet interessante Möglichkeiten bei der Erfassung von Waldstrukturen. Im Rahmen eines, durch die High Tech Offensive Bayern [1] geförderten Projektes wurde die Eignung von flugzeuggetragenen Laserscannern für die Erfassung von Baumhöhen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz der neuen Technologie der terrestrischen Baumhöhenmessung überlegen ist. Die Messung der Baumhöhen ist insbesondere bei Laubholz und bei sehr hohen Bäumen genauer als bei praxisüblicher Messung vom Boden aus. Außerdem liefert das Verfahren im Gegensatz zu einer Stichprobeninventur ein kontinuierliches Bild der Oberfläche des betreffenden Waldgebietes.

Innovative Methoden zur Erfassung von Waldstrukturen

Die Entwicklung neuer Fernerkundungssensoren hat Produkte auf den Markt gebracht, deren Einsatz neue Möglichkeiten bei der Erfassung von Waldstrukturen erwarten lässt. Um das Potenzial dieser Sensoren und neuartiger Auswerteverfahren zu untersuchen, wurde im Nationalpark Bayerischer Wald das Projekt „Innovative Fernerkundungsmethoden zur Erfassung von Waldstrukturen“ ins Leben gerufen. Die Datenerhebung fand in vier Testgebieten statt, die unterschiedliche Waldgesellschaften auf insgesamt 3.000 ha repräsentieren. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene flugzeuggetragene Sensoren wie Laserscanner, multifrequentes Radar, optische Scanner und Stereoluftbilder eingesetzt. Parallel zur Aufnahme der Fernerkundungsdaten konnte eine umfangreiche Bodenreferenz von 44 hochgenau vermessenen Referenzflächen und 700 permanenten Inventurpunkten aufgenommen werden. Außerdem fand eine im bayerischen Wirtschaftswald übliche Beschreibung der

Waldbestände nach Waldentwicklungsstadien statt [2].

Funktionsweise der LIDAR-Technologie

Mit einem Laserstrahler wird das Gelände mit kurzen Impulsen abgetastet. Dabei wird die Zeitdauer zwischen Aussenden des Laserimpulses bis zum Empfangen dessen Reflexion (Laser Range Finder) gemessen, woraus die Entfernungen zwischen reflektierender Oberfläche und Flugzeug abgeleitet werden können. Da die exakte Position des Flugzeuges durch GPS (Global Positioning System) und dessen Lage im Raum mit einem INS (Inertial Navigation System) bestimmt wird, lassen sich die Höhen der Reflexionssorte sehr exakt im geodätischen Bezugssystem berechnen [3].

Für eine Berechnung der Baumhöhe ist es erforderlich, aus den Laserscannerdaten zwei Oberflächen zu berechnen: Die Bodenoberfläche lässt sich im unbelaubten Zustand besser erkennen, deshalb wurden hierfür Befliegungen im Winter durchgeführt (Digital Terrain Model, DTM). Um den Kronenbereich optimal abtasten

zu können, wurde eine Sommerbefliegung durchgeführt, aus der die Vegetationsoberfläche (Digital Surface Model, DSM) abgeleitet wurde.

Kennzahlen zur Leistung des Laserscannings

Flugzeuggetragene Messgeräte haben heute eine enorme Leistungsfähigkeit: Die Sensoren sind in der Lage, bis zu 83.000 Entfernungsmessungen pro Sekunde durchzuführen. Auf einem Quadratmeter beflogener Fläche ist es damit möglich, je nach Flughöhe und -geschwindigkeit, 5 bis 10 Messpunkte zu erfassen. Die geräteinterne Genauigkeit ist erstaunlich groß, Abweichungen treten in x- bzw. y-Richtung bis zu 30 cm auf, in z-Richtung nur bis zu 15 cm. Das im Projekt eingesetzte Laser-System „Falcon“ der Firma Toposys ist in der Lage, aus einer Höhe von bis zu 1.600 m über Grund zu operieren. Der Footprint, also der Durchmesser des Laserimpulses am Boden, beträgt bei einer mittleren Flughöhe von 1.000 m ca. 1 m. Darüber hinaus ist das System in der Lage, die erste und letzte Reflexion eines jeden Laserimpulses aufzuzeichnen.

Terrestrische Messungen

Als Referenz für die Untersuchung der Messgenauigkeit dienten Daten von 26 terrestrisch eingemessenen Testflächen mit einer Gesamtgröße von 10,5 ha. Auf den Referenzflächen wurden alle Baumhöhen konventionell bestimmt und die Position jedes Baumes hochgenau, d.h. im Zentimeterbereich, gemessen. Ein Einzelbaumcode ermöglichte die spätere Zuordnung der Daten zu einem bestimmten Baum. Die Baumhöhenmessung erfolgte mit dem VERTEX-System auf Basis der trigonometrischen Baumhöhenbestimmung, insgesamt konnten die Höhenmes-

M. Heurich ist stellvertretender Leiter des Sachgebietes Forschung und Dokumentation der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald und Koordinator des Forschungsprojektes „Innovative Methoden zur Erfassung von Waldstrukturen“. S. Günther und S. Schröder studieren Forstwissenschaft in Freiburg, Prof. Dr. E. Kennel war Leiter des Fachgebietes Waldinventur und Forstbetriebsplanung an der Technischen Universität München und Leiter des Forschungsprojektes.

Tab. 1: Identifizierungsrate von Einzelbäumen aus einem Bestandeshöhenmodell mit einer Auflösung von 0,5 m

Identifizierungsrate	Mischwald	Nadelholz	Totholz	Gesamt
Oberschicht	69,31 %	73,41 %	77,68 %	72,11 %
Zwischenschicht	17,11 %	14,57 %	59,78 %	21,66 %
Unterschicht	2,89 %	0,74 %	40,93 %	8,27 %
Gesamt	24,38 %	36,99 %	56,16 %	32,77 %

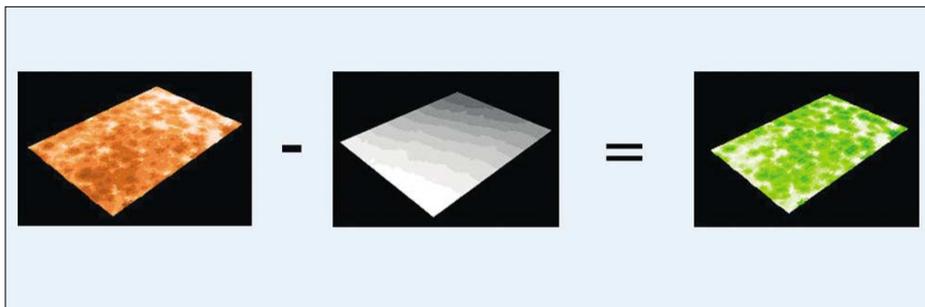


Abb. 1: Berechnung des Bestandeshöhenmodells: Subtraktion des DTM vom DSM

sungen an 1.001 Bäumen verglichen werden [4].

Weitere Bearbeitung der Daten

Aus den vom Laserscanner erfassten Reflexionsorten berechnete die Firma Toposys ein DTM und ein DSM. Durch die Subtraktion des DTM vom DSM wurde ein „Bestandeshöhenmodell“ (vgl. Abb. 1) erstellt. Dieses gibt den Abstand zwischen Bodenoberfläche und dem jeweils exakt lotrecht darüber erfassten Vegetationsbestandteil, also die Höhe des Bestandes, wieder (vgl. Abb. 2). Mithilfe der Software ArcView GIS der Firma ESRI war es nun möglich, visuell eine Baumspitze als lokales Maximum der Bestandeshöhendaten zu erkennen und die Höhe des Bestandeshöhenmodelles an dieser Stelle zu bestimmen. Durch die exakte Positionsbestimmung der auf dem Boden gemessenen Bäume konnten diese nun lagerichtig zusammen mit dem Bestandeshöhenmodell am Bildschirm visualisiert werden. Damit war ein direkter Vergleich von den vom Boden bestimmten Baumhöhen mit den aus dem Bestandeshöhenmodell gemessenen Baumhöhen möglich.

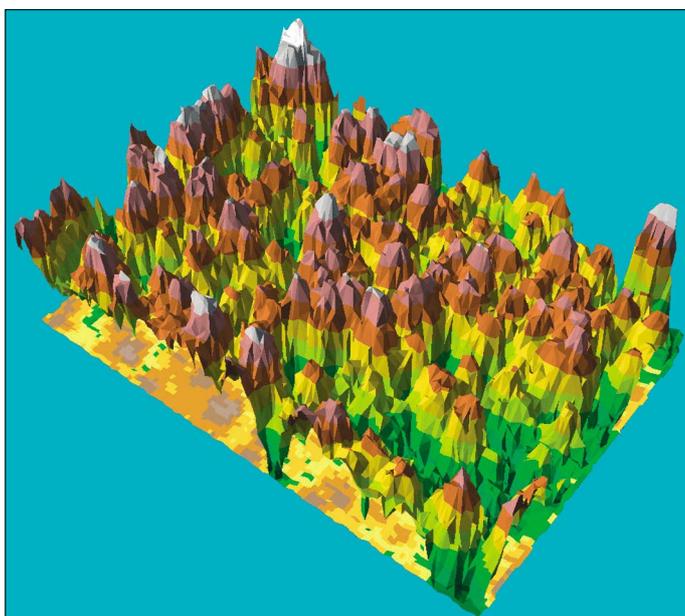


Abb. 2: 3D-Ansicht eines lichten Fichtenbestandes auf Grundlage des Bestandeshöhenmodells

Wie viele Bäume konnten eindeutig identifiziert werden?

Für die Auswertungen wurden nur die Bäume der Bodenreferenz berücksichtigt, die eindeutig im Bestandeshöhenmodell identifiziert werden konnten.

Von den relevanten Bäumen der Ober- bis 2/3 Oberhöhe) konnten über 72 % im Baumhöhenmodell eindeutig identifiziert werden (siehe Tab. 1). In der Mittel- und Unterschicht war die Identifizierungsrate mit 21,6 bzw. 8,3 % erwartungsgemäß niedriger.

Die Messgenauigkeit

In einem zweiten Schritt wurden die aus dem Bestandeshöhenmodell ermittelten Baumhöhen mit den Daten der Bodenreferenz verglichen. Der Mittelwert der Messhöhendifferenz aller gemessenen Bäume beträgt - 0,53 m bei einer Standardabweichung von $\pm 1,24$ m (vgl. Abb. 3). Das bedeutet, dass die mit dem Laser ermittelten Baumhöhen um 0,5 m geringer ausfallen als die terrestrisch gemessenen. Dies hängt damit zusammen, dass der Wipfeltrieb bei den Nadelhölzern aufgrund

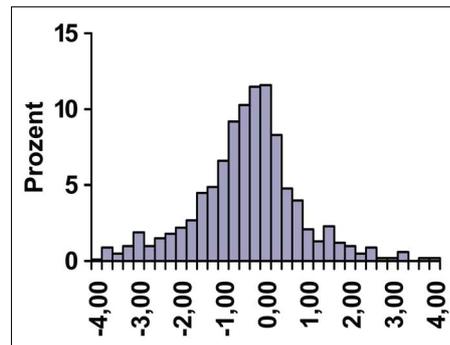


Abb. 3: Relative Messhöhendifferenz zwischen terrestrisch und mit dem Laserscanner erfassten Baumhöhen ($n = 1.001$)

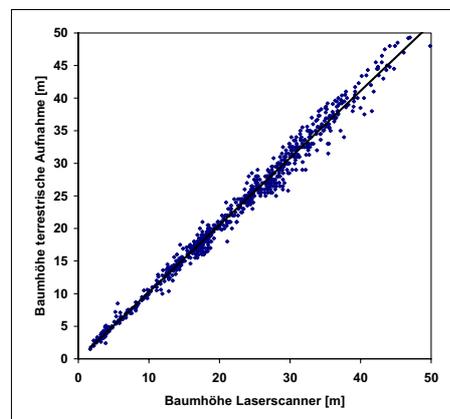


Abb. 4: Vergleich der terrestrisch erfassten Baumhöhen mit den Messungen des flugzeuggetragenen Laserscanners ($R^2 = 0,9874$, $y = 1.029x - 0.0385$)

seiner geringen Größe nicht erfasst wird und die Reflexion des Messimpulses erst beim ersten oder zweiten Astquirl erfolgt. Deshalb ist die systematische Abweichung beim Nadelholz auch etwas größer.

Die Nadelhölzer erreichen auf den Kontrollflächen häufig Höhen von über 25 m bis zu 47 m. Bei so großen Baumhöhen wird der Fehler der terrestrischen Höhenmessung größer. So zeigte sich, dass die Messhöhendifferenz bei Bäumen über 30 m im Mittel - 1,8 m bei einer Standardabweichung von $\pm 1,55$ m beträgt, während sie bei den niedrigeren Bäumen nur - 0,32 m (Standardabweichung $\pm 1,04$ m) aufwies.

Bei abgestorbenen Nadelhölzern beträgt diese Abweichung nur - 0,26 m (Standardabweichung $\pm 0,79$ m). Dass die systematische Abweichung hier geringer ist, hängt damit zusammen, dass diese Bäume häufig abgebrochen sind und dass die Bruchstelle den Impuls besser reflektiert als eine Wipfelknospe. Außerdem ist hier auch der Fehler der terrestrischen Messungen geringer, da die Bruchkante ein gutes Ziel zum Anvisieren bildet, weil

Tab. 2: Vergleich der Differenzen von Baumhöhenmessungen zwischen flugzeuggetragenen Laserscannern und terrestrischen Messungen mit dem Vertex-System

	Anzahl	Mittelwert (relativ)	Standard- abweichung (relativ)	Mittelwert (absolut)	Standard- abweichung (absolut)
Laubholz	308	-0,37 m	1,43 m	1,17 m	0,90 m
Nadelholz	448	-0,79 m	1,25 m	1,14 m	0,95 m
Totholz	245	-0,26 m	0,79 m	0,55 m	0,62 m
Alle Messungen	1.001	-0,53 m	1,24 m	1,01 m	0,90 m
BAUER [6]	1.203	0,07 m	1,40 m	1,01 m	0,98 m

die Sicht in abgestorbenen Bestandesteilen besser ist und weil die Stümpfe oft relativ niedrig sind.

Die größte Standardabweichung der Höhendifferenzen finden wir mit $\pm 1,43$ m bei Laubbäumen. Dies ist wohl weniger auf die Messungenauigkeiten des Laserscanners zurückzuführen, sondern eher auf die Schwierigkeiten bei der terrestrischen Höhenmessung. Das Problem bei Laubbäumen, den richtigen Punkt in der Krone anzuvisieren, sind bekannt. Zudem wurden die Messungen im belaubten Zustand durchgeführt, wo der Wipfeltrieb häufig durch Laub der Seitenäste verdeckt ist.

Im Vergleich zu herkömmlichen Baumhöhenmessungen bei Waldinventuren schneidet die Baumhöhenermittlung aus dem digitalen Bestandeshöhenmodell sehr gut ab. BAUER [5] untersuchte die Genauigkeit von Höhenmessungen bei Waldinventuren, indem er Kontrollmessungen an 1.203 Bäumen mit den Erstmessungen verglich. Der Mittelwert der Höhendifferenzen lag in dieser Studie bei 0,07 m, es lag also kein systematischer Fehler bei einer der beiden Messungen vor. Die Standardabweichungen der Höhenmessungen lagen allerdings bei $\pm 1,4$ m. Der Absolutwert der Differenzen betrug im Mittel 1,01 m bei einer Standardabweichung von $\pm 0,98$ m. Diese Werte liegen im Bereich der Abweichungen zwischen Laserscannern und terrestrischen Höhenmessungen. Der größte Unterschied liegt in der Unterschätzung der Baumhöhen durch die Messungen mit Laserscannern. Dieser systematische Fehler kann jedoch durch Anwendung eines Regressionsmodells korrigiert werden, das die Länge des Wipfeltriebes aus anderen Baumparametern (Baumhöhe, Kronengröße) schätzt.

Abschließend kann gefolgert werden, dass die Genauigkeit der Baumhöhenmessungen mit flugzeuggetragenen Laserscannern zumindest der von terrestrischen Baumhöhenmessungen entspricht, bei Laubhölzern und sehr hohen Bäumen größer ist. Die Messergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass die Streuung der Messungen stärker durch die terrestrischen wie durch die Laserscannermessungen bedingt sind.

Fehler durch Hangneigung

In die Überlegungen zur Messgenauigkeit des Laserscannings wurde die Möglichkeit miteinbezogen, dass durch am Hang schief stehende Bäume ein systematischer Fehler auftritt (vgl. Abb. 5). Im Mittel hatten die Referenzflächen eine Neigung von $10,3^\circ$, die mittlere Entfernung von der Stammachse zum Lot der Baumspitze betrug 1,08 m. Daraus lässt sich errechnen, dass der mittlere Messfehler am Hang 0,20 m beträgt. Bei stärkerer Hangneigung muss diese Fehlerquelle sicher berücksichtigt werden. In der vorliegenden Untersuchung ist der theoretische Messfehler durch Hangneigung aber bei mehr als 85 % aller gemessenen Bäume geringer als 50 cm und kann damit aus forstlicher Sicht toleriert werden.

Hat der Einsatz von Laserscannern Zukunft im Forstbereich?

Mehrere Gründe sprechen dafür, dass flugzeuggetragene Laserscanner in Zukunft eine größere Bedeutung für die Datengewinnung im Rahmen der Forsteinrichtung erlangen werden:

- Zum einen zeigt diese Studie, dass die Genauigkeit der Baumhöhenmessungen zumindest mit terrestrischen Aufnahmen vergleichbar ist.
- Vorteilhaft ist zudem, dass die Waldoberfläche quasi kontinuierlich abgetastet wird und die Baumhöhenmessung somit nicht auf wenige Messbäume auf Stichprobenpunkten beschränkt ist.
- Darüber hinaus verfügen die aus den Lasermessungen abgeleiteten Daten auch über das Potenzial, dass auch weitere forstliche Größen daraus erfasst werden können. Dazu gehören vor allem Kronenschluss, Kronengröße und die vertikale Bestandesstruktur. Aufbauend auf diesen Größen kann schließlich auch auf den Vorrat geschlossen werden.

Diese Fragen und die Entwicklung von Algorithmen zur automatisierten Ableitung von Einzelbaumparametern wie Kronenradius und Baumhöhe sowie Bestandesparametern wie Bestandesgrenzen, Schichtung und Verjüngung sind zurzeit Gegenstand mehrerer Forschungsprojek-

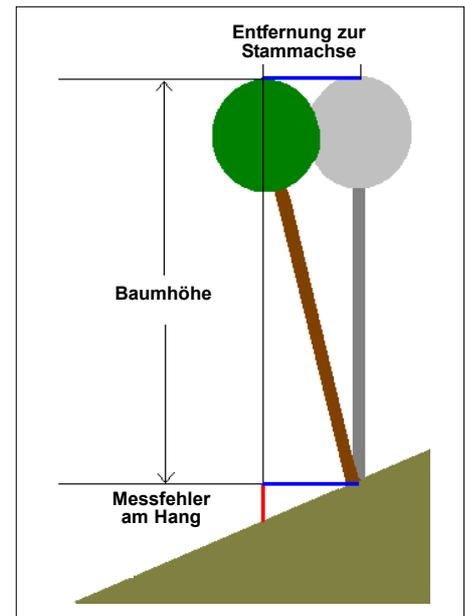


Abb. 5: Schematische Darstellung des Messfehlers am Hang

te. Die Kosten für die Datengewinnung sind zurzeit noch sehr hoch. In den nächsten Jahren ist jedoch mit einer spürbaren Kostenreduktion zu rechnen, da der zunehmende Einsatz von flugzeuggetragenen Lasersensoren zu einem erhöhten Wettbewerb zwischen dem Anbieter und einer Reduktion der Sensorkosten führen wird. Zudem wird eine verbesserte Sensorik Befliegungen in größeren Höhen erlauben, wodurch sich die Befliegungszeiten verkürzen.

Im Gegensatz dazu muss bei herkömmlichen Inventuren aufgrund des hohen Personalkostenanteils von eher steigenden Kosten ausgegangen werden, wenn nicht die Informationsqualität reduziert werden soll.

Durch Kopplung von Laserscannern mit optischen Sensoren können zusätzliche Daten erfasst werden. Dies wird dazu beitragen, dass Waldinventuren auch im mitteleuropäischen Raum in nicht allzu ferner Zukunft zu einem Teil vom Flugzeug aus durchgeführt werden, wie dies beispielsweise in skandinavischen Ländern bereits der Fall ist.

Literaturhinweise:

- [1] HEURICH, M.; RALL, H. (2003): Bits, Bytes und Borkenkäfer. Mit Hightech der Natur auf der Spur. Allgemeine Forstzeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltfürsorge. 9/2003. S. 437-438. [2] HEURICH, M.; SCHNEIDER, T.; KENNEL, E. (2003): Laser Scanning for Identification of Forest Structures in the Bavarian Forest National Park. In: Hyypää, Naesset, Olsson, Pahlen und Reese, Edits-Proceedings of the Scandlaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests. S. 97-106. [3] WEHR, A.; LOHR, U. (1999): Airborne laser scanning – an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing 54, 68-82. [4] KRAMER, AKCA (1995): Leitfaden zur Waldmesslehre. J. D. Sauerländers Verlag, Frankfurt am Main. 266 p. [5] BAUER, A. (2001): Möglichkeiten zur Extensivierung der Forsteinrichtung im Hochgebirge durch Einsatz moderner Techniken der Luftbilddatenauswertung. Forstliche Forschungsberichte München. Nr. 137.