

Überprüfung der Baumhöhenbestimmung aus Daten flugzeuggetragener Laserscanner in strukturreichen Naturwäldern des Nationalparks Bayerischer Wald

MARCO HEURICH, Grafenau & ECKHARD KENNEL, Freising

Keywords: Forest Inventory, Digital Crown Model, Laser Scanning, Height determination

Summary: *Evaluation of tree height determination from airborne laser scanner data over the richly structured natural forests of the Bavarian Forest National Park.* The purpose of this study was to investigate the accuracy of manual tree height measurements with airborne laser scanners. The study material included small-footprint time-of-flight laser scanner data acquired in the spring and summer of 2002 using a TopoSys Falcon II airborne laser system over the montane mixed forests dominated by Norway spruce (*Picea abies*) and European beech (*Fagus sylvatica*) of the Bavarian Forest National Park near Passau, Germany. A data set based on 3055 trees in 23 different stands was available for the determination of the accuracy of tree height measurements using laser scanning data. 1001 of these trees could be correctly identified visually with the laser scanning data. Tree heights are underestimated by an average of 0.53 m. The standard deviation was 1.24 m. The average value of the absolute tree height differences was 1.01 m, with a standard deviation of 0.9 m. The underestimation of height was greater among conifers (0.74 m) than among deciduous trees (0.37 m). However, the standard deviation was higher for deciduous trees (1.43 m) than for conifers (1.25 m). The deviation in height was corrected with the aid of regression models attaining a coefficient of determination of 0.99 m. In regard to height measurements, these results indicate a similar level of accuracy as those acquired through conventional forestry practices. Indeed, there are some indications that they may even be more accurate.

Zusammenfassung: Das Ziel dieser Studie war es, die Messgenauigkeit von flugzeuggetragenen Laserscannern für die Baumhöhenbestimmung zu überprüfen. Dazu wurden im Frühling und Sommer 2002 Daten mit dem flugzeuggetragenen Laserscanner Falcon II der Firma TopoSys in den von Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Fichte (*Picea abies*) dominierten Wäldern des Nationalparks Bayerischer Wald erfasst. Dafür stand ein Datensatz von 3055 Bäumen zur Verfügung. Davon konnten 1001 Bäume eindeutig mit Hilfe des DWM visuell identifiziert werden. Im Mittel wurde die Baumhöhe um 0,53 m unterschätzt. Die Standardabweichung betrug 1,24 m. Der Mittelwert der absoluten Baumhöhendifferenzen lag bei 1,01 m, deren Standardabweichung bei 0,9 m. Dabei war die Unterschätzung der Baumhöhen bei den Nadelbäumen mit 0,74 m stärker ausgeprägt als bei den Laubbäumen (0,37 m). Im Gegenzug war die Standardabweichung bei den Laubbäumen (1,43 m) größer als bei den Nadelbäumen (1,25 m). Die Korrektur der Höhenabweichungen wurde mit Regressionsmodellen durchgeführt, die ein Bestimmtheitsmaß von 0,99 erreichten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Höhenmessgenauigkeit von flugzeuggetragenen Laserscannern zumindest der von herkömmlichen forstlichen Methoden entspricht, einige Indizien deuten sogar darauf hin, dass sie besser ist.

1 Einleitung

Die genaue Erfassung von Baum- und Bestandeshöhen ist von zentraler Bedeutung

für die Charakterisierung der Wälder im Rahmen von Waldinventuren. Bereits mit dieser Größe lassen sich relativ gute Abschätzungen des Holzvorrates oder der Bio-

masse vornehmen. Schon EICHHORN (1904) stellt fest, dass „zwei Bestände unabhängig von der Bonität das gleiche Volumen haben, wenn ihre Mittelhöhe übereinstimmt“. Eine genaue 3D-Abbildung von Boden- und Bestandesoberfläche zur Bestandeshöhenermittlung ist damit eine wesentliche Voraussetzung, um Fernerkundungssensoren erfolgreich für forst- und naturschutzfachliche Fragestellungen in Wäldern einsetzen zu können.

Dabei spielt das digitale Geländemodell (DGM) eine sehr wichtige Rolle. Erst durch das DGM als Bezugsoberfläche lassen sich weitere Analysen durchführen. Ein genaues DGM ist damit die Grundlage für viele weiterführende Auswertungen. Je nach Anwendung bestehen dabei unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen. Wenn nur Bestandeshöhen ermittelt werden sollen, sind die Anforderungen geringer, als wenn die Höhe von einzelnen Bäumen bestimmt werden soll. Bei der Bestimmung des Oberflächenmodells (DOM) soll die Waldoberfläche möglichst genau dreidimensional abgebildet werden.

Wellenlängen aus dem optischen Bereich werden bereits im Kronenbereich absorbiert. Hier finden die Wechselwirkungen auf Molekülebene (Wasser, Zellpigmente) statt, so dass sie Rückschlüsse auf Blattchemie, -struktur und -zustand erlauben (HILDEBRAND 1996). Die damit verbundenen Verdeckungen (Okklusionen) verhindern aber das Eindringen der Strahlung bis in tiefer gelegene Vegetationsschichten. Deshalb eignen sich passive Sensoren im optischen Bereich auch nicht besonders gut für die direkte Schätzung von Bestandeshöhe und Holzvorrat in vorratsreichen Wäldern. Bestätigt wird diese Überlegung von HYYPPÄ et al. (2000), die beim Vergleich mehrerer passiver optischer Sensoren für die Schätzung von Bestandeshöhe und Holzvorrat einen Fehler von 40 bzw. 50% ermitteln. Die Untersuchungen zeigen, dass in Bereichen mit geringen Holzvorräten eine Über- und in Bereichen mit hohen Holzvorräten eine Unterschätzung der tatsächlichen Werte erfolgt (REESE et al. 2003). Allerdings können mit Hilfe von Stereobildern aus optischen Daten

über Bildzuordnungstechniken bessere Ergebnisse erzielt werden.

Mit aktiven Sensoren ist man in der Lage, die Bestandesoberfläche partiell zu durchdringen. Allerdings ist diese Fähigkeit im Sommer durch die hohe Vegetationsdichte – insbesondere bei Laubbäumen – eingeschränkt. Im Winter wiederum sind die Bedingungen zur Modellierung des DGM sehr günstig. Allerdings ist es in dieser Jahreszeit schwieriger, ein genaues DOM über Laubwaldbereichen abzuleiten, da die Laserstrahlen unterschiedlich weit in die Krone eindringen und deshalb die Baumhöhen bei geringen Punktdichten unterschätzt werden. Je nach eingesetztem System wird nur die erste (First Pulse) und letzte Reflexion (Last Pulse) des Laserimpulses, mehrere Reflexionen oder der gesamte Signalverlauf (Full waveform) aufgezeichnet. Die Berechnung des DGM erfolgt anschließend aus den Last Pulse- und die des DOM aus den First-Pulse-Daten. Unter optimalen Bedingungen haben Laserscanner eine sehr gute absolute Höhenmessgenauigkeit. So können bei leicht einzusehenden, unbewachsenen Oberflächen wie Straßen oder Tennisplätzen Genauigkeiten von unter 15 cm in der Höhe und 30 cm in der Lage erreicht werden. Dabei setzt sich dieser Fehler aus Messungenauigkeit der einzelnen Sensoren GPS, INS und Laserentfernungsmesser zusammen (CROMBAGHS et al. 2002).

Aufgrund der zentralen Bedeutung für forstliche Fragestellungen soll in dieser Arbeit die Messgenauigkeit von Laserscannern zur Erfassung von Einzelbaumhöhen untersucht werden. Grundlage für die Überprüfung der mit Hilfe von Laserscannern bestimmten Baumhöhen ist dabei eine umfangreiche Referenz von am Boden mit herkömmlichen Methoden bestimmten Baumhöhen. Dabei wurden die Messdifferenzen manuell bestimmt, um Fehler, die beispielsweise durch eine automatische Baumsegmentierung entstehen, ausschließen zu können.

2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Nationalpark Bayerischer Wald in Südost-

deutschland an der Grenze zur Tschechischen Republik. Es handelt sich um ein Mittelgebirge mit einer Höhererstreckung zwischen 600 und 1453 m. Innerhalb des Parks kommen drei Hauptwaldökosysteme vor:

- a) Hochlagen: Über 1100 m befinden sich natürliche Fichtenwälder, die vor allem aus der Rotfichte (*Picea abies*) gebildet werden. Als Begleiter tritt die Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*) auf.
- b) Hanglagen: Auf den Hängen zwischen 600 m und 1100 m wachsen Bergmischwälder, die sich aus Rotfichte, Weißtanne (*Abies alba*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) zusammensetzen.
- c) Tallagen: In den durch Nassböden und nächtlichen Kaltluftstau geprägten Tallagen wachsen wiederum vor allem Rotfichten, Vogelbeere und Birken (*Betula pendula*, *Betula pubescens*; HEURICH & NEUFANGER 2005).

Im Nationalpark wurde 2002 ein Testgebiet für Fernerkundung eingerichtet, in dem die Eignung verschiedener Sensoren und Auswertemethoden für die Erfassung von Waldstrukturen überprüft werden soll (HEURICH 2006).

2.1 Laserscannerdaten

Für die Aufnahmen wurde der flugzeuggetragene Laserscanner Falcon II der Firma TopoSys (Topografische Systemdaten GmbH) verwendet. Die Befliegung der Testgebiete fand zu drei verschiedenen Terminen im laublosen (März und Mai 2002) und belaubten Zustand (September 2002) statt. Das Scanmuster auf dem Boden zeigt einen geringen Abstand der Messpunkte in Flugrichtung und einen großen Abstand der Messpunkte quer zur Flugrichtung. Details zum System finden sich unter WEHR & LOHR (1999) und SCHNADT & KATZENBEISSER (2004).

Die durchschnittliche Punktdichte während dieser Flüge lag bei 5 Messpunkten pro m² im laublosen und 10 im belaubten Zustand. Für jeden emittierten Laserpuls wurde die erste und letzte Reflexion des Laser-

Tab. 1: Systemparameter der Laserscannerbefliegungen.

Scannertyp	Gepulster Faserlaser
Wellenlänge	1560 nm
Pulsdauer	5 nsec
Zeilenfrequenz	653 Hz
Pulsrate	83 000 Hz
Blickwinkel	14.3°
Datenaufzeichnung	First- und Last pulse
Flughöhe	800 m
Durchmesser Laserstrahl am Boden	0.8 m
Punktabstand in Flugrichtung	0.12 m
Punktabstand quer zur Flugrichtung	1.6 m

strahls aufgezeichnet. Die Systemparameter des Fluges sind in Tab. 1 aufgeführt. Anschließend wurden die Datensätze mit der TopPit-Software (TopoSys Processing and Imaging Tool) prozessiert und klassifiziert.

2.2 Referenzflächen

Insgesamt wurden dreiundzwanzig für die verschiedenen Waldökosysteme repräsentative Versuchsflächen erfasst. Sie haben eine Größe zwischen 0,1 und 0,25 ha und sind nach den verschiedenen Waldentwicklungsstadien (BOBIEC et al. 2000, HEURICH & NEUFANGER 2005) stratifiziert:

Jugendstadium (JS): Aufwachsen bis Dickungsschluss.

Wachstumsstadium (WS): Holzvolumenaufbau bis zur Kulmination des laufenden Zuwachses.

Reifungsstadium (RS): Abklingen des Holzvolumenaufbaus und der Zuwachsleistung, „Vitales Erscheinungsbild“.

Verjüngungsstadium (VS): Hochwachsen der Verjüngung im Schutz der Altbäume.

Pleterstadium (PS): Waldstruktur mindestens dreischichtig (incl. Zwischenschicht und Vorausverjüngung); auch Moor- und Moorrandbestockungen (i. d. R. Hoch- und Übergangsmoorstandorte).

Mortalstadium (MS): Flächen ohne lebende Bäume mit stehendem und/oder liegendem Totholz.

Die Felddatenerfassung fand zwischen Mai und November 2002 statt. Auf den Versuchsfeldern wurden Brusthöhendurchmes-

ser (Durchmesser eines Baumes in 1,3 m Höhe gemessen), Baumart, Baumhöhe und Kronenansatz für alle Bäume größer 5 m bestimmt. Dabei wurden die Höhenmessungen mit dem „Vertex III“ System entsprechend den Definitionen von KRAMER & AKCA (1995) durchgeführt. Jede Stammpo-

Tab. 2: Beschreibung der Untersuchungsflächen.¹

Flächen Nr.	WES	Baumarten	Lbh. [%]	Alter [a]	Höhe NN [m]	Neigung [%]	Flächen-größe [m ²]
1	MS	Fi, Vobe	8	10	1180	5,5	20 × 150
2	MS	Fi, Vobe	13	10	1190	4,6	20 × 100
3	MS	Fi, Vobe	21	10	1180	9,8	20 × 100
4	MS	Fi, Vobe	27	10	1180	0,7	20 × 120
5	JS	Fi, Vobe, ELbh	70	20	873	5,7	10 × 280
6	WS	Fi	1	65	1235	24.2	20 × 50
7	WS	Fi	3	40	810	2.7	20 × 50
8	WS	Fi, Vobe, Bu, ELbh	100	70	1160	20.2	20 × 50
9	RS	Fi, Bu, ELbh	41	75	805	2.9	20 × 60
10	RS	Bu, ELbh, Fi	96	95	875	13.0	20 × 60
11	RS	Bu	100	105	835	4.6	20 × 60
12	VS	Fi	0	160	1240	9.5	20 × 80
13	VS	Fi	0	135	1225	1.5	20 × 50
14	VS	Fi	0	95	765	13.1	20 × 50
15	VS	Fi	4	90	710	13.6	20 × 50
16	VS	Bu, Fi, ELbh	74	120	850	16.8	20 × 50
17	VS	Bu, Fi	100	30	820	5,5	50 × 50
18	VS	Bu, ELbh	100	110	890	15.3	20 × 50
19	PS	Fi	0	165	1220	11.5	20 × 50
20	PS	Fi, Ta	1	250	610	0.4	20 × 50
21	PS	Fi, Ta	4	170	640	16.9	20 × 60
22	PS	Bu, Fi, ELbh	71	170	885	29.8	20 × 100
23	PS	Bu, Fi, ELbh	86	170	860	6.4	20 × 100

¹ WES: Waldentwicklungsstadien. MS: Mortalitätsstadium, JS: Jugendstadium, WS: Wachstumsstadium, RS: Reifungsstadium, VS: Verjüngungsstadium, PS: Plenterstadium, Baumarten: die wichtigste Baumart wird an erster Stelle genannt, Lbh. (Laubholzanteil in Prozent). Fi: Fichte; Vobe: Vogelbeere; Bu: Buche; Ta: Tanne; ELbh: Edellaubholz.

sition wurde sehr genau mit Tachymetermessungen und DGPS bestimmt. Die absolute Lagegenauigkeit wurde genau überprüft und auf 5 cm geschätzt. Das Holzvolumen jedes Baumes wurde mit Volumenfunktionen nach KENNEL (1973) bestimmt. Die Beschreibungen der Versuchsbestände finden sich in Tab. 2.

3 Methodisches Vorgehen

Für die im Folgenden beschriebenen Analysen wurden das Laserscanner-DGM aus der Winterbefliegung (ohne Laub) und das DOM aus der Sommerbefliegung (mit Laub) verwendet. Anschließend wurde durch Subtraktion des DGM vom DOM ein digitales Waldmodell (DWM) erstellt, welches die normalisierte Waldhöhe beschreibt.

Tab. 3: Anteil von Einzelbäumen in Prozent, die in dem Laserscanner-Waldhöhenmodell durch visuelle Interpretation eindeutig einem am Boden gemessenen Baum zugeordnet werden konnten.

	Mischwald	Nadelwald	Totholz	Gesamt
Oberschicht	69.3	73.4	77.7	72.4
Zwischenschicht	17.1	14.6	59.8	21.3
Unterschicht	2.9	0.7	40.9	8.3
Gesamt	24.4	37.0	56.2	33.1

Es gibt den Abstand zwischen Bodenoberfläche und dem jeweils exakt lotrecht darüber erfassten Vegetationsbestandteil, also die Höhe der Bäume, wieder.

Durch Verwendung eines Geoinformationssystems war es nun möglich, Baumgipfel als lokales Maximum im DWM zu erkennen und den dazu korrespondierenden Höhenwert zu bestimmen. Die exakte Positionsbestimmung, der auf dem Boden gemessenen Bäume, war die Voraussetzung dafür, dass diese mit dem Geoinformationssystem lagerichtig zusammen mit dem DWM am Bildschirm dargestellt werden konnten. Damit war ein direkter Vergleich von den vom Boden bestimmten Baumhöhen mit den aus dem DWM gemessenen Baumhöhen möglich. Aus den Messwertdifferenzen für die Gruppen Nadelbäume, Laubbäume und Totholz (abgestorbene Nadelbäume, die z.T. abgebrochen sind) wurden Mittelwert, Standardabweichung (relativ) und RMS-Fehler berechnet. Zusätzlich wurde für die Beträge der Messwertdifferenzen die Standardabweichung berechnet (absolut).

4 Ergebnisse

Für die Auswertungen wurden nur die Bäume der Bodenreferenz berücksichtigt, die eindeutig im DWM identifiziert werden konnten (siehe Tab. 3). Von den relevanten Bäumen der Oberschicht (bis 2/3 Oberhöhe) konnten über 72% im DWM eindeutig erkannt werden. In der Mittel- und Unter-

Tab. 4: Vergleich der Differenzen von Baumhöhenmessungen durch Laserscanner und terrestrische Referenzmessungen (Vertex-Baumhöhenmesser).

	Anzahl	Mittelwert (relativ) [m]	Standardabweichung (relativ) [m]	Mittelwert (absolut) [m]	Standardabweichung (absolut) [m]	RMS Fehler [m]
Laubbäume	308	-0.37	1.43	1.17	0.90	1.48
Nadelbäume	448	-0.79	1.25	1.14	0.95	1.48
Totholz	245	-0.26	0.79	0.55	0.62	0.84
Alle Messungen	1001	-0.53	1.24	1.01	0.90	1.35

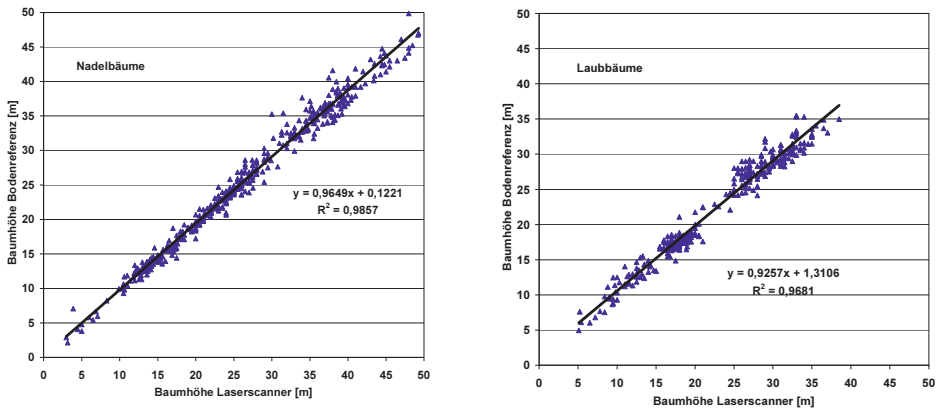


Abb. 1: Ausgleichung der Unterschätzung der Baumhöhen mit einer linearen Regression.

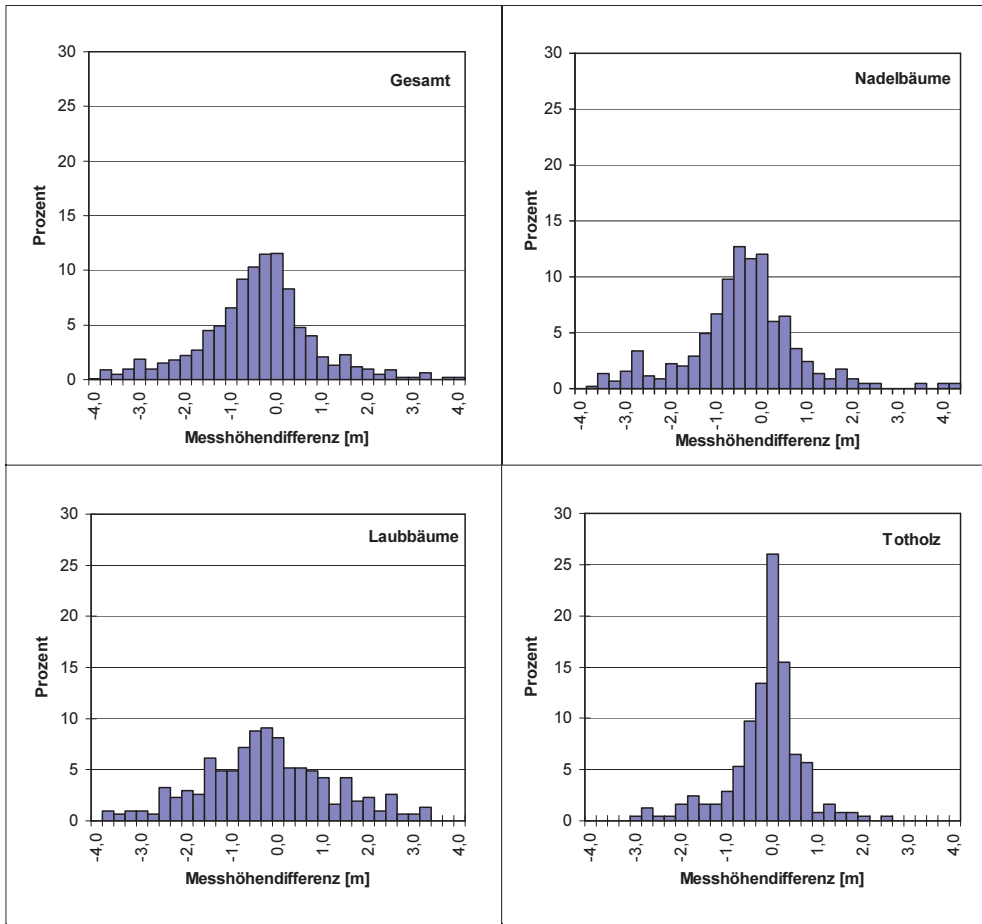


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der Differenzen zwischen den mit Laserscannern bestimmten Baumhöhen und den korrespondierenden terrestrischen Referenzmessungen.

schicht war die Identifizierungsrate mit 21,6 bzw. 8,3% erwartungsgemäß niedriger, da diese Bäume aufgrund ihrer geringen Größe meist nicht im DWM abgebildet werden. Am höchsten war sie beim Totholz, gefolgt vom Nadelwald und vom Mischwald.

Für die Analysen wurden die aus dem DWM ermittelten Baumhöhen mit den Daten der Bodenreferenz verglichen (siehe Tab. 4). Der Mittelwert der Messhöhendifferenz aller gemessenen Bäume beträgt $-0,53$ m. Das bedeutet, dass die mit dem Laser ermittelten Baumhöhen um etwa ei-

nen halben Meter geringer ausfallen, als die am Boden bestimmten Referenzdaten (Ground truth). Bei den Nadelbäumen ist diese Abweichung mit $-0,79$ m am stärksten ausgeprägt, während sie bei den abgestorbenen Bäumen mit $-0,26$ cm den niedrigsten Wert erreicht. Auch bei den Laubbäumen ist dieser Fehler mit $-0,37$ m relativ gering. Vergleicht man den Mittelwert der absoluten Abweichungen, ergibt sich ein etwas anderes Bild. Hier erreichen Nadel- und Laubbäume mit 1,14 und 1,17 m ein sehr ähnliches Ergebnis. Der Wert für die

Tab. 5: Vergleich der Baumhöhenbestimmung durch Laserscanner mit den Baumhöhenmessungen im Gelände auf den einzelnen Referenzflächen.

Flächen Nr.	Anzahl gemessener Bäume	Mittelwert (relativ) [m]	Standardabweichung (relativ) [m]	Mittelwert (absolut) [m]	Standardabweichung (absolut) [m]	RMSE [m]
1	80	-0.37	0.76	0.59	0.60	0.84
2	61	-0.55	1.35	1.10	0.95	0.43
3	41	-0.17	0.78	0.51	0.81	0.79
4	51	-0.46	1.00	0.79	0.77	1.10
5	56	0.32	1.40	1.00	1.02	1.42
6	88	-0.61	0.71	0.77	0.53	0.93
7	68	-0.94	0.95	1.07	0.80	1.33
8	91	-0.31	0.93	0.77	0.60	0.97
9	36	-0.56	1.14	0.99	0.78	1.25
10	40	-0.10	1.42	1.14	0.84	1.41
11	34	-1.29	1.12	1.39	0.99	1.70
12	39	-0.78	0.57	0.81	0.53	0.96
13	38	-1.01	0.69	1.07	0.59	1.22
14	38	-1.80	1.50	2.09	1.04	2.33
15	21	-1.87	1.36	2.04	1.06	2.29
16	24	-1.07	1.82	1.74	1.18	2.08
17	51	-0.13	1.14	0.85	0.77	1.34
18	25	-0.78	2.08	1.99	0.93	2.19
19	26	0.17	0.88	0.65	0.60	0.88
20	18	-0.29	1.95	1.52	1.21	1.92
21	15	-0.42	1.67	1.94	0.93	2.13
22	27	-0.55	1.71	1.44	1.05	1.77
23	33	-0.41	1.72	1.32	1.15	1.74

abgestorbenen Nadelbäume ist mit 0,55 nur etwa halb so hoch. Die Ergebnisse für die einzelnen Flächen sind in Tab. 5 dargestellt.

Die Nadelbäume erreichen auf den Referenzflächen häufig Höhen von über 25 m bis zu 47 m. Bei solch großen Baumhöhen wird der Erfahrung nach der Fehler der terrestrischen Höhenmessung immer größer. So zeigte sich, dass die Messhöhendifferenz bei Bäumen über 30 m im Mittel $-1,80$ m bei einer Standardabweichung von 1,55 m beträgt, während sie bei den niedrigeren Bäumen nur $-0,32$ m (Standardabweichung 1,04 m) aufweist.

Um die Unterschätzung der Baumhöhen auszugleichen, wurden lineare Regressionen gerechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 1 dargestellt.

Die Variabilität der Messungen war bei den Laubbäumen mit einer Standardabweichung der relativen Messwertdifferenzen von 1,43 m besonders hoch. Sehr wenig haben die Messungen hingegen beim Totholz gestreut, so dass die Standardabweichung hier nur 0,79 m beträgt. Bei den Nadelbäumen beträgt sie 1,25 m. Die Standardabweichung der absoluten Abweichungen ist erwartungsgemäß geringer. Bei diesem Parameter liegen Nadel- und Laubbäume mit etwa 0,9 m gleichauf, mit 0,62 m erreicht das Totholz den niedrigsten Wert. Der RMS-Fehler ist bei Nadel- und Laubbäumen mit 1,48 m identisch. Beim Totholz ist er mit einem Wert von 0,84 m deutlich geringer. Die Häufigkeitsverteilung der Messdifferenzen ist in Abb. 2 dargestellt.

5 Diskussion

Im Vergleich zu herkömmlichen Baumhöhenmessungen bei Waldinventuren schneidet die Baumhöhenermittlung aus dem DWM sehr gut ab. BAUER (2001) untersuchte die Genauigkeit von terrestrischen Höhenmessungen, die mit dem gleichen Verfahren wie in der vorliegenden Studie durchgeführt wurden, bei Waldinventuren, indem er Kontrollmessungen an 1203 Bäumen mit den Erstmessungen verglich. Der Mittelwert der Höhendifferenzen lag bei 0,07 m, es lag also nur ein geringer systematischer Fehler

bei einer der beiden Messungen vor. Die Standardabweichung der Höhenmessungen lag allerdings bei 1,4 m. Der Absolutwert der Differenzen betrug im Mittel 1,01 m bei einer Standardabweichung von 0,98 m. Auch die von ECKMÜLLNER & RIEGER (2000) beschriebenen Fehler bei der Baumhöhenmessung mit dem Messgerät Suunto liegen für Fichte (1,12 m) und Buche (1,64 m) im gleichen Bereich, wie die Abweichungen zwischen Messungen mit dem Laserscanner und terrestrischen Referenzmessungen. Im Gegensatz zu den Referenzmessungen wird die Baumhöhe aus den Laserscannerdaten jedoch unterschätzt, worauf bereits in anderen Untersuchungen hingewiesen wurde (HYYPÄ & INKINEN 1999, PERSSON et al. 2002, GAVEAU & HILL 2003, LECKIE et al. 2003).

Die Unterbestimmung wird im Wesentlichen durch fünf Faktoren beeinflusst:

- a) Zum einen sind die Wipfeltriebe meist sehr dünn. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, von einem Laserstrahl getroffen zu werden relativ gering. Auf diese Erklärung deuten auch die Ergebnisse aus den Messungen hin: Die große Unterbestimmung bei den Nadelbäumen erklärt sich dadurch, dass der Wipfeltrieb auf Grund seiner geringen Größe nicht erfasst wird und die Reflexion des Messimpulses erst beim ersten oder zweiten Astquirl erfolgt. Im Vergleich dazu ist die systematische Abweichung bei den abgestorbenen Nadelbäumen viel geringer. Dies hängt damit zusammen, dass diese Bäume häufig abgebrochen sind und die Bruchstelle zusammen mit den verbliebenen Totästen, eine größere Reflexionsfläche besitzt als die Wipfelknospe. Die starken Abweichungen, die GAVEAU & HILL (2003) mit 1,27 m bei Laubbäumen ermittelt haben, konnten hier nicht bestätigt werden. Damit hat ihre Schlussfolgerung, dass ein Teil der Reflexionen bei Laubbäumen erst unter der Kronenoberfläche erfolgt für die vorliegende Studie keine Gültigkeit. Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse könnte das unterschiedliche Reflexionsverhalten von

- Licht- und Schattbaumarten sein. Während in der Studie von GAVEAU & HILL (2003) Lichtbaumarten (Esche, Eiche, Aspe, Birke) untersucht wurden, handelt es sich bei dieser Studie vor allem um Buchen.
- b) Zum andern wirkt sich auch das Abtastmuster des TopoSys-Laserscanners auf die Messgenauigkeit aus. Während der Punktabstand in Flugrichtung mit im Mittel 0,12 m sehr gering ist, beträgt er quer zur Flugrichtung 1,6 m. Dieses Abtastmuster hat zur Folge, dass Baumspitzen teilweise nicht getroffen werden, da sie sich zwischen den Scanlinien befinden. Aufgrund des raschen Höhenabfalls in den Nadelbaumkronen ist die systematische Abweichung bei den Nadelbäumen auch stärker ausgeprägt als bei den Laubbäumen mit ihrer eher kugelförmigen Krone.
- c) Ein weiterer Grund ist die Aufbereitung der Laserscannerdaten, da die Höhenwerte nicht aus den Rohdaten, sondern aus dem DOM entnommen wurden. Durch die Berechnung des DOM wird der tatsächliche Verlauf der Oberfläche geglättet, was zu einer Unterschätzung der Gipfel und einer Überschätzung der „Täler“ zwischen den Bäumen führt.
- d) Daneben spielt die Messpunktdichte die zentrale Rolle, da eine höhere Messpunktdichte auch die Wahrscheinlichkeit erhöht, den Wipfeltrieb zu treffen. Untersuchungen zeigen, dass sich bei einer Messpunktdichte von unter 5 Punkten/m² die Unterschätzung der Baumhöhe auffällig erhöht (HIRATA 2004, YU et al. 2004).
- e) Auch die Genauigkeit der DGM-Modellierung kann hier bei einzelnen Flächen einen Einfluss auf die Unterschätzung der Bäume haben. So tragen umgestürzte, auf dem Boden liegende Bäume dazu bei, dass die Unterbestimmung beim Totholz (in diesen Beständen befinden sich besonders viele auf dem Boden liegende Bäume), geringer ist als bei den Nadel- und Laubbäumen. Auch die beobachtete „Hebung“ des DGM durch dichte Verjüngung kann einen gewissen Einfluss

ausüben (HEURICH et al. in prep.) Deshalb wurde untersucht, inwieweit die Qualität der Baumhöhenmessung durch ein genaueres DGM verbessert werden kann. Dazu wurde die jeweilige Baumhöhe im DWM um die Abweichung des DGM von der tatsächlichen Höhe des Stammfußes korrigiert. Die einzelflächenweise Auswertung ergab dabei jedoch nur geringe Abweichungen, die sich im Schnitt über alle Flächen auf Null ausmittelten. Die forstlich relevante Messgenauigkeit im Dezimeterbereich bleibt somit von der Verwendung eines korrigierten DGM weitestgehend unbeeinflusst.

Dabei kann die Unterbestimmung der Bäume sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Beispielsweise fanden HYYPPÄ & INKINEN (1999) bei einer Messpunktdichte von 10/m² einen negativen Bias von nur 0,14 m, während PERSSON et al. (2002) bei einer Messpunktdichte von 4/m² und automatischer Kronendelinierung eine Unterschätzung von 1,13 m berechneten. Die von GAVEAU & HILL (2003) bestimmten Abweichungen erreichten 0,91 m für Büsche und 1,3 m für Laubbäume. Die Messpunktdichte in dieser Studie betrug nur 0,2/m². Das heißt, die Unterbestimmung kann in Abhängigkeit von den oben beschriebenen Faktoren stark schwanken und durch eine möglichst hohe Messpunktdichte minimiert werden.

Die Unterschiede in der Streuung der Messwertdifferenzen bei Laubbäumen, Nadelbäumen und abgestorbenen Nadelbäumen können neben dem Abtastmuster des Scanners auch auf die Bedingungen für die Bodenmessungen mit dem Vertex III zurückgeführt werden. Die Streuung bei den abgestorbenen Nadelbäumen ist am geringsten, da hier auch die Bedingungen für die terrestrischen Referenzmessungen am günstigsten sind. Darüber hinaus sind diese Bäume häufig abgebrochen und die Bruchkante stellt ein gutes Ziel dar. Durch ihre geringe Höhe können die Stümpfe relativ genau gemessen werden, darüber hinaus ist auch die Sicht in den abgestorbenen Bestandteilen besser als in geschlossenen Beständen. Auch

bei den Nadelbäumen kann der Wipfeltrieb meist eindeutig angesprochen werden. Größere Abweichungen treten bei den terrestrischen Höhenmessungen im Gelände jedoch bei sehr hohen Bäumen und bei Laubbäumen auf. In beiden Fällen liegt ein Problem darin, die Gipfeltriebe zu erkennen. Insbesondere in der Vegetationsperiode, wenn die Sicht zur Baumspitze durch Blätter behindert ist, kann das in gemischten, strukturierten Beständen sehr schwierig sein. Die Schwierigkeiten, den richtigen Punkt in der Laubbaumkrone anzuvisieren, sind bekannt. Darüber hinaus dürfte der Messwinkel für hohe Bäume sehr steil gewesen sein, da mit dem Vertex-Höhenmesser keine Distanzmessungen über 35 m hinaus durchgeführt werden können. Kleine Ableseungenauigkeiten können dann zu großen Abweichungen führen. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass bei sehr hohen Bäumen und Laubbäumen die Messgenauigkeit des Laserscanners besser als bei Referenzmessung ist, da die Baumhöhe keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit des Laserscanners hat. Zu diesen Schlussfolgerungen kommen auch die Untersuchungen von BRANDTBERG et al. (2003) und HYYPPÄ & INKINEN (1999).

In die Überlegungen zur Messgenauigkeit des Laserscanners wurde die Möglichkeit mit einbezogen, dass durch am Hang schief stehende Bäume ein systematischer Fehler auftritt. Um diesen Fehler abschätzen zu können, wurde für jede Referenzfläche die Hangneigung aus den DGM bestimmt. Darüber hinaus lag für jeden Baum die Entfernung zwischen Stammfußpunkt und Baumspitze vor. Damit war es möglich, unter der Annahme, dass alle Bäume vom Hang weg geneigt sind, ein „Worst Case Szenario“ zu berechnen. Bei 804 ausgewerteten Bäumen ergab sich dabei ein mittlerer Fehler von nur 12,5 cm. Insgesamt war der absolute Messfehler durch die Hangneigung bei 98 % der untersuchten Bäume geringer als 50 cm und kann deshalb für das Untersuchungsgebiet (durchschnittliche Hangneigung der Referenzflächen 10 %) vernachlässigt werden. In Gebieten mit stärkerer Hangneigung muss diese Fehlerquelle jedoch berücksichtigt werden.

6 Schlussfolgerungen

Aus den vorliegenden Ergebnissen kann gefolgert werden, dass die Genauigkeit der manuell durchgeführten Baumhöhenmessungen mit Laserscannerdaten zumindest der von terrestrischen Baumhöhenmessungen entspricht. Die Messergebnisse deuten sogar darauf hin, dass die Streuung der Differenzen stärker durch Fehler bei den Referenzmessungen als bei den Laserscannermessungen bedingt sind. Dies zeigt sich vor allem in der höheren Streuung der Messwertdifferenzen bei Laubbäumen und bei Bäumen mit einer Höhe von über 30 m, die nicht auf die Messungen mit dem Laserscanner, sondern auf methodische Schwierigkeiten bei den Referenzmessungen zurückzuführen sind. Die gefundene systematische Unterschätzung der Baumhöhen stellt dabei kein Problem dar, da dieser Fehler mit Hilfe der Regressionsrechnung korrigiert werden kann. Allerdings ist es bislang nicht möglich, einen universellen Korrekturfaktor zu entwickeln, da die Unterschätzung von verschiedenen Faktoren wie Sensortyp, Jahreszeit, Baumart, Messpunktdichte u. a. m. abhängig ist. Trotzdem stellen Laserscanner mit Genauigkeiten im Dezimeter-Bereich die derzeit beste Methode zur flächendeckenden Wiedergabe von Waldoberflächen dar.

Literatur

- ANDERSEN, H.-E., REUTEBUCH, S. & MCGAUGHEY, R., 2005: Accuracy of an IfSAR-derived digital terrain model under a conifer forest canopy. – *Canadian Journal for Remote Sensing* **31** (4): 283–288.
- BAUER, A., 2001: Möglichkeiten zur Extensivierung der Forsteinrichtung im Hochgebirge durch Einsatz moderner Techniken der Luftbildauswertung. – *Forstliche Forschungsberichte München* Nr. **137**.
- BOBIEC, A., VAN DER BURGT, H., MEIJER, K., ZUYDERDUYN, C., HAGA, J. & VLAANDEREN, B., 2000: Rich deciduous forests in Bialowieza as a dynamic mosaic of developmental phases: premises for nature conservation and restoration management. – *Forest Ecology and Management* **130**: 159–175.
- BRANDTBERG, T., WARNER, T. A., LANDENBERGER, R. E. & MCGRAW, J. B., 2003: Detection and

- analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. – *Remote Sensing of Environment* **85**: 290–303.
- CROMBAGHS, M., OUDE ELBERINK, S., BRÜGELMANN, R. & DE MIN, E., 2002: Assessing height precision of laser altimetry DEMs. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **34** (3A): 85–90.
- ECKMÜLLNER, O. & RIEGER, W., 2000: Informationen für den Forstbereich aus Laserscannerdaten. – *Angewandte geografische Informationsverarbeitung XII, Beiträge zum AGIT Symposium*, 124–135.
- EICHHORN, F. 1904: Beziehungen zwischen Bestandeshöhe und Bestandesmasse. – *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **80**: 45–49.
- GAVEAU, D.L.A., & HILL, R.A., 2003: Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small footprint airborne laserscanning data. – *Canadian Journal of Remote Sensing* **29**: 650–657.
- HEURICH, M., & NEUFANGER, M., 2005: Die Wälder des Nationalparks Bayerischer Wald. Ergebnisse der Waldinventur 2002/2003 im geschichtlichen und waldökologischen Kontext. – *Wissenschaftliche Schriftenreihe der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald*, Band **16**.
- HEURICH, M., 2006: Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren. – *Forstliche Forschungsberichte München* **202/2006**.
- HILDEBRANDT, G., 1996: Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. – Wichmann Verlag, Heidelberg.
- HIRATA, Y., 2004: The effects of footprint size and sampling density in airborne laser scanning to extract individual trees in mountainous terrain. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (8/W2): 102–107.
- HYYPÄ, J. & INKINEN, M., 1999: Detection an estimating attributes for single trees using laser scanner. – *The photogrammetric journal of Finland* **16**: 27–46.
- HYYPÄ, J., HYYPÄ, H., INKINEN, M., ENGDAHL, M., LINKO, S. & ZHU, Y., 2000: Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. – *Forest Ecology and Management* **128**: 109–120.
- KENNEL, E., 1973: Bayerische Waldinventur. – *Forstliche Forschungsberichte München Nr.* **11**.
- KRAMER, H. & AKCA, A., 1995: Leitfaden zur Waldmesslehre. – J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- LECKIE, D., GOUGEON, F., HILL, D., QUINN, R., ARMSTRONG, L. & SHREENAN, R., 2003: Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. – *Canadian Journal of Remote Sensing* **29** (5): 633–649.
- PERSSON, A., HOLMGREN, J. & SÖDERMANN, U., 2002: Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **68** (9): 925–932.
- SCHNADT, K. & KATZENBEISSER, R., 2004: Unique airborne fiber scanner technique for application-oriented lidar products. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (8/W2): 19–23.
- REESE, H., NILSSON, M., GRANDQVIST PAHLEN, T., HAGNER, O., JOYCE, S., TINGELÖF, U., EGBERTH, M. & OLSSON, H., 2003: Countrywide Estimates of Forest Variables Using Satellite Data and Field Data from the National Forest Inventory. – *Ambio* **32** (8).
- WEHR, A. & LOHR, U., 1999: Airborne laser scanning – an introduction and overview. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54**: 68–82.
- YU, Y., HYYPÄ, J., HYYPÄ, H. & MALTAMO, M., 2004: Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser scanning. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (8/W2): 96–101.

Anschriften der Autoren:

Dr. MARCO HEURICH, Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, Sachgebiet für Forschung und Dokumentation, D-94481 Grafenau, Tel.: +49-8552-9600-136, Fax: -102, e-mail: marco.heurich@npv-bw.bayern.de.

Prof. Dr. ECKHARD KENNEL, Technische Universität München, Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung, Am Hochanger 13, 85354 Freising, Tel.: +49-8161-71-4694, Fax: -4616, e-mail: kennel@forst.wzw.tum.

Manuskript eingereicht: Februar 2008
 Angenommen: Mai 2008