

Verfahren zur automatischen Bestimmung von Forstinventurparametern aus terrestrischen Laserscannerpunktewolken

ANNE BIENERT¹, STEFFEN SCHELLER²

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, welches aus 3D-Punktewolken eines terrestrischen Laserscanners die Inventurparameter von Bäumen in Waldbeständen vollautomatisch ermittelt. Es werden Algorithmen zur Detektion und Segmentierung von Bäumen in 3D-Punktewolken angewendet, um die Anzahl und Näherungspositionen der vorhandenen Bäume zu erhalten. Neben der automatischen Baumfußpunktbestimmung welche in Abhängigkeit von der Neigung des angrenzenden Geländes bestimmt wird, wird eine Baumhöhenbestimmung durchgeführt. Abschließend werden Ergebnisse der Baumdetektierung, Baumfußpunkt- und Baumhöhenbestimmung vorgestellt. In den österreichischen Testgebieten (547 Bäume) wurden 97% der Bäume erfolgreich detektiert. Die Baumhöhen wurden im Mittel (3,30 m) zu groß bestimmt. Der Vergleich der Baumhöhen, ermittelt im Single- und Multiple-Scan Modus, zeigt eine genauere Höhenbestimmung bei Verwendung von mehreren Standpunkten.

1 Einleitung

Knapp 30% des deutschen Staatsgebietes ist Wald. Um diesen zu kontrollieren und zu bewirtschaften, werden in periodischen Zeitabständen Forstinventuren durchgeführt. In einem Zweimann-Verfahren werden dabei stichprobenartig Inventurparameter wie z.B. Baumart, Baumhöhe, Brusthöhendurchmesser, Entfernung und Azimut vom Zentrum des Stichprobengebietes sowie Flächenmerkmale und Qualität der Bäume interaktiv gemessen und erfasst. Als Alternative zu dieser personalintensiven Erfassungsstrategie bietet sich eine automatische Erfassung der Geometrieparameter von Bäumen aus terrestrischen Laserscannerpunktewolken an. Durch die dichten dreidimensionalen Punktewolken ist ein hoher Dokumentationswert gegeben und eine Automatisierung der Ableitung der Geometrieparameter realisierbar. Die Automatisierung bringt zudem eine Objektivierung der Baumparameteranalyse unterschiedlicher Baumarten mit sich. Die automatische Ableitung 3D-Baumparameter kann über die Bestimmung des Brusthöhendurchmessers (BHD) hinaus beispielsweise leicht auf die Durchmesserbestimmungen entlang des Stammes erweitert werden (BIENERT et. al, 2007). Die Automatisierung ermöglicht aufgrund der berührungslosen Messungen Volumenschätzungen am stehenden Stamm in sehr kurzer Zeit, welche bei der konventionellen Stichprobenerhebung nur durch aufwändige Fällaktionen erhalten werden können.

1) Anne Bienert, TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden; E-Mail: Anne.Bienert@tu-dresden.de

2) Steffen Scheller, TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden; E-Mail: Steffen.Scheller@tu-dresden.de

Für eine automatisierte Auswertung ist die Detektion der Bäume Voraussetzung, welche hauptsächlich in horizontalen Schnitten über dem DGM abläuft. ASCHOFF et al. (2004) erstellen aus einem gerasterten Schnitt ein 2D-Image, dessen Grauwerte der Anzahl der Punkte im Raster entsprechen. Über eine Houghtransformation und einem Kreis- bzw. Ellipsenfittung werden die Stämme detektiert. KIRÁLY & BROLLY (2007) stellen zwei Ansätze zur Segmentierung von Baumstämmen vor. Der erste Ansatz ist eine Clustermethode in Kombination mit einer ausgleichenden Kreisberechnung, die 142 von 169 Bäumen erfolgreich detektiert. Bei der zweiten Methode wird in Single-Scans nach halbkreisförmigen Objekten gesucht und ebenfalls ein Kreis eingepasst. Dabei wurden 166 von 169 Bäumen erfolgreich detektiert.

Bei der Bestimmung der Höhe von Waldbäumen aus Laserscannerpunktwolken zeigen manuelle Messungen bessere Ergebnisse als automatisierte Verfahren. HOPKINSON et al. (2004) definieren die Baumhöhe als Vektor aus höchstem und niedrigstem Punkt, der zuvor von benachbarten Ästen manuell bereinigten Baumpunktwolke. Im Mittel wurden die Bäume 1,5 m zu klein bestimmt. ASCHOFF et al. (2004) führen einen Baumhöhenschätzung mit Schaftformfunktionen durch. Dabei erreichen sie eine mittlere Abweichung von 6 m. KIRÁLY & BROLLY (2007) verwenden das Digitale Kronenmodell eines jeden Baumes zur Detektion der Baumspitze. Das lokale Maximum des Kronenmodells wird der Baumposition zugeordnet, die der zuvor über den Stammverlauf berechneten Baumspitzenposition am nächsten kommt. Die Baumhöhen wurden mit einem RMS-Fehler von 1,4 m bestimmt.

Kapitel 2 stellt die Datensätze von zwei Testgebieten vor, welche Gegenstand der Ergebnisanalysen sind. In Kapitel 3 werden Segmentierungsalgorithmen zum Detektieren von Bäumen in Schnitten von 3D-Punktwolken präsentiert. Ausgehend von den detektierten Baumpositionen werden die Baumfußpunkte in Abhängigkeit vom angrenzenden Gelände bestimmt und die Baumhöhe abgeleitet (Kapitel 4). Anschließend folgt in Kapitel 5 eine Präsentation der Ergebnisse aus den Testgebieten. Eine Diskussion (Kapitel 6) beendet den Beitrag.

2 Testgebiete

Im Frühjahr 2006 wurden im Wienerwald, ca. 25 km westlich von Wien, 22 Plots aufgenommen. Die Plots hatten einen Radius von 15 m. Das Alter der Bestände lag zwischen 65 und 140 Jahren. Neben den Scanaufnahmen wurden BHD, Baumhöhe, Azimut und Distanz zum Plotzentrum, der im Plot befindlichen Bäume manuell erfasst. Die Baumhöhen wurden für jeden Bestandesmittelstamm der vorliegenden Baumarten mit einem Vertex gemessen. Die restlichen Baumhöhen wurden mittels einer Einheitshöhenkurve geschätzt. Für die Datenakquisition der österreichischen Plots wurde ein Faro LS 800 HE80 Laserscanner mit einer phasenabhängigen Entfernungsmessung und einer mittleren Punktgenauigkeit von ± 3 mm verwendet (FARO, 2005). Die hier vorgestellten Testdaten wurden im Single-Scan Modus (THIES et. al, 2003) mit einer Scanauflösung von $0,045^\circ$ aufgenommen. Dazu wird eine runde Fläche (Plot) innerhalb des Testgebietes festgelegt, aus deren Zentrum die Scanaufnahme erfolgt.

Ein weiterer Plot wurde im März 2007 mit dem Riegl LMS-Z420i gescannt. Dieser Panorama-View Scanner verwendet zur Streckenmessungen das Impulslaufzeitverfahren. Die mittlere Punktmessgenauigkeit ist ± 8 mm (RIEGL, 2006). Insgesamt wurden 22 Buchen (Alter: 140 Jahre)

in einem Radius von 15 m im Single- sowie Multiple-Scan Modus mit einer Scanauflösung von $0,05^\circ$ aufgenommen. Für den Single-Scan wurden, um die vertikale Begrenzung des Gesichtsfeldes zu umgehen, im Zentrum drei verschwenkte Aufnahmen gemacht. Von zwei weiteren Standpunkten außerhalb des Plotradius (östlich und westlich) wurden die Daten des Multiple-Scans aufgenommen. Diese Standpunkte wurden über zuvor im Messgebiet verteilte retroreflektierende Zylinder registriert und in ein lokales Koordinatensystem mit dem Ursprung im Plotzentrum transformiert. Die Baumfußpunkte wurden mit dem Tachymeter und die Baumhöhen (mit einem Vertex) sowie die Brusthöhendurchmesser (mit Kluppe) manuell erfasst. Das Gelände war südlich um 6° exponiert und verfügte über wenig Unterholz.

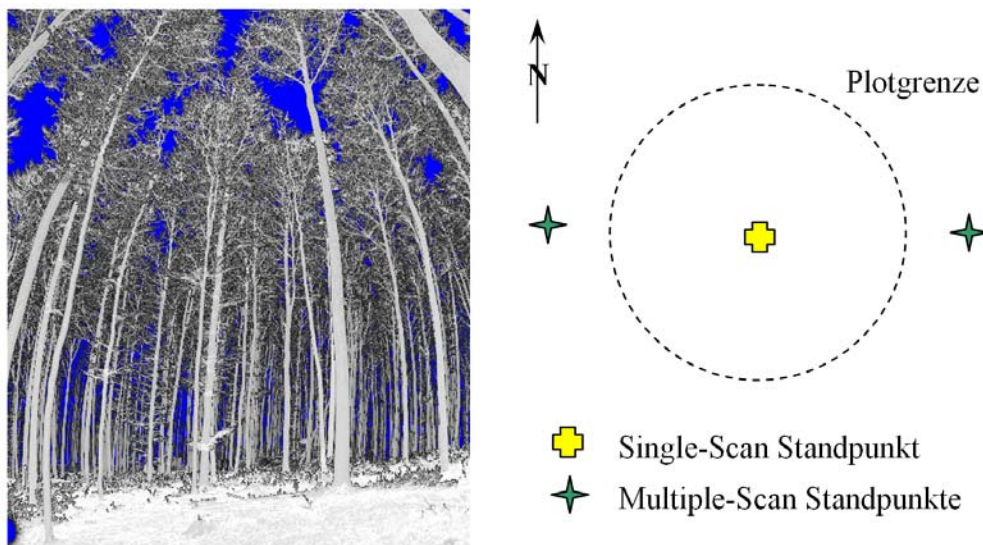


Abb. 1: Intensitätsbild des Buchenplots (links); Aufnahmekonfiguration des Buchenplots (rechts)

3 Baumdetektion

In Abhängigkeit von der Scanauflösung, der Entfernung und Ausrichtung der Stammoberfläche zum Scanner, beschreiben die Laserscannerpunkte ein Raster auf dem Objekt. Da die Baumstämme innerhalb eines Plotes annähernd vertikal ausgerichtet sind, ergeben sich in horizontalen Schnitten durch die Punktwolke an den Positionen der Stämme Punktanhäufung. Um die Anzahl und die Näherungspositionen der im Plot befindlichen Bäume zu erhalten, werden nach der Generierung des Digitalen Geländemodells (DGM) zwei Segmentierungsalgorithmen in drei horizontalen Schnitten über dem DGM durchgeführt.

3.1 Vorsegmentierung

Zunächst werden in der Vorsegmentierung (BIENERT et al., 2007) die Punkte in einem 2D-Separierungsalgorithmus (SCHELLER & SCHNEIDER, 2006) auf Punktanhäufungen untersucht und in einzelne Punktcluster unterteilt. Punktcluster mit einer Anzahl kleiner als eine vorgegebene Mindestanzahl ($Anzahl_{min}$) werden eliminiert und nicht weiter beachtet. Zum Klassifizieren der einzelnen Punktcluster wird ein ausgleichender Kreis mit den Clusterpunkten bestimmt und

anhand von zwei Ausschlusskriterien (mittlere Gewichtseinheitsfehler m_0 und Radius r_{\min}) das Objekt klassifiziert. Die Ergebnisse der Vorsegmentierung beinhalten jedoch Fehler 1. und 2. Art (BIENERT et al., 2007). Da die Schnitte in konstanten Abständen definiert sind, ist nicht auszuschließen, dass die Stämme an Stellen von abgehenden Ästen geschnitten werden. Solche Punktcluster, die sowohl Stamm- als auch Astpunkte enthalten, erzeugen in der ausgleichenden Kreisberechnung einen zu großes m_0 . Anhand des vorgegebenen Grenzwertes werden diese Punktcluster nicht als Baum klassifiziert (Fehler 1. Art). Objekte, die in der Vorsegmentierung zurückgewiesen wurden, werden in einem zweiten Schritt, der Feinsegmentierung, erneut untersucht.

3.2 Feinsegmentierung

Im Gegensatz zu der Vorsegmentierung werden nun die Punktcluster hinsichtlich der Punktdichte innerhalb eines Rasters analysiert. Die Feinsegmentierung verläuft in fünf Schritten:

1. Bestimmung der Objektbegrenzung (x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} , y_{\max})
2. Einteilung der Fläche in ein regelmäßiges Raster
3. Zählen der im Raster befindlichen Punkte
4. Separierung der Raster dessen Anzahl größer als eine $Anzahl_{\max}$ ist
5. Erneute Berechnung des ausgleichenden Kreises

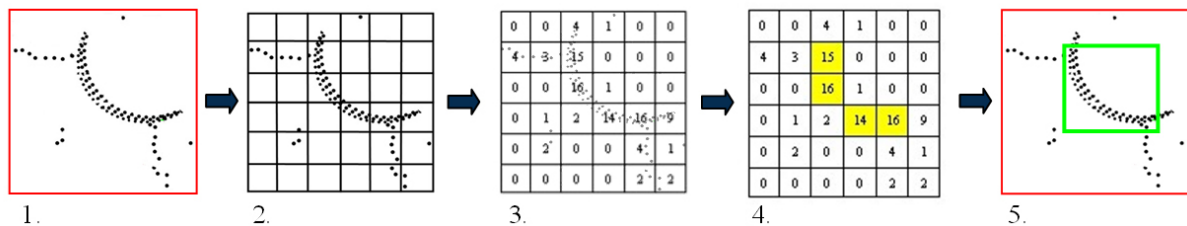


Abb. 2: Arbeitsschritte der Feinsegmentierung

Der Grenzwert $Anzahl_{\max}$ (4. Schritt) zur Separierung der Stammpunkte ergibt sich aus der Scanauflösung, der Entfernung des Rasterelementes zum Scanner und der Schnittdicke. Dabei wird von einer diagonal durch das Raster verlaufenden Stammoberfläche ausgegangen. Die somit berechnete Sollpunktzahl wird zu optimistisch angenommen. Eine Reduzierung dieses Wertes um 30% ergibt den Grenzwert $Anzahl_{\max}$. Voraussetzung für eine erfolgreiche Baumerkennung in der Feinsegmentierung ist eine hohe Punktdichte innerhalb der Rasterelemente. Dies erfordert eine geeignete Schnittdicke in Abhängigkeit von der verwendeten Scanauflösung. Letztendlich wird mit Hilfe der Feinsegmentierung eine Separierung der Stammpunkte von den Astpunkten innerhalb des Clusters durchgeführt und somit Fehlklassifizierungen 1. Art minimiert.

4 Baumfußpunkt

Mit Hilfe der Näherungsposition aus der Segmentierung werden die Bäume mit einem vertikal stehenden Zylinder separiert. Somit werden nur die Punkte innerhalb des Zylinders für weitere Parameterbestimmungen verwendet, was eine Optimierung der Prozessierungszeit mit sich zieht.

Der BHD ist neben der Baumhöhe der wichtigste Baumparameter, da mit dessen Hilfe u.a. eine Baumhöhenschätzungen und Durchmesserschätzungen in unzugänglichen Höhen am Stamm möglich sind. In 1,30 m über dem Baumfußpunkt wird der BHD ermittelt. Wird nun der tiefste Punkt innerhalb des Baumzylinders als Baumfußpunkt festgelegt, führt dies bei geneigtem Gelände zu einer zu kleinen Brusthöhe. Eine Geländeneigung von bereits 5° verursacht bei einem Baumzylinder mit einem Radius von 1,5 m eine Höhendifferenz von knapp 13 cm. Der BHD würde somit 13 cm zu tief ermittelt werden. Bei geneigtem Gelände ist die Brusthöhe am Stamm in 1,30 m über dem hangaufwärts liegenden Baumfußpunkt definiert. Wie in BIENERT et al., (2007) vorgestellt, bestimmt sich der Baumfußpunkt aus dem Gradienten der ausgleichenden Ebene der angrenzenden Bodenpunkte (Abb.3). Aufgrund von Bodenvegetation ist tendenziell ein zu hoch gelegener Fußpunkt zu erwarten.

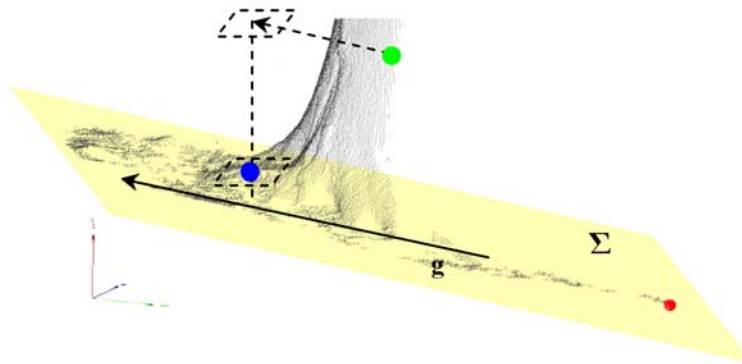


Abb. 3: Ermittlung des Baumfußpunktes

5 Baumhöhe

Die Baumhöhe wird aus der Differenz der Z-Werte des höchsten Punktes und des Baumfußpunktes innerhalb des separierten Baumzylinders bestimmt. Dies setzt eine lotrechte Aufstellung des Scanners bzw. eine nachträgliche Überführung der Punktwolke in ein lotrechtes Koordinatensystem voraus. Aufgrund von Verdeckungen im Kronenbereich wird die Baumspitze nur lückenhaft erfasst, was zu einer zu kleinen Baumhöhe führen kann. Daher bietet es sich an, die Scanaufnahmen prinzipiell im unbelaubten Zustand durchzuführen. Eine zu große Baumhöhe kann zwei Ursachen haben. Zum einen kann der Radius des Baumzylinders (zur Abgrenzung der jeweiligen Baumvolumina) zu groß sein. Die Baumhöhe für einen kleineren Baum wird dann zu groß ausfallen, da benachbarte dominanteren Bäume, deren Äste in den Zylinder hineinragen, fälschlicher Weise den höchsten Punkt erzeugen (Abb. 4 links). Zum anderen verursachen vorhandene Geisterpunkte (Abb. 4 rechts) über dem Kronendach eine falsche Höhe. Diese Punkte können durch interne Mehrdeutigkeiten bei der Aufnahme des Laserscanners (abhängig vom Messverfahren und vom eingesetzten Instrument) entstehen. Da nicht alle Geisterpunkte mit der Steuerungssoftware des Scanners eliminiert werden, wird eine erneute Filterung vor der Baumhöhenableitung durchgeführt. Die Nachbarpunkte eines Laserpunktes werden hinsichtlich der Anzahl und Entfernung innerhalb eines bestimmten Bereiches analysiert und der zu betrachtende Laserpunkt (nach Erfüllen verschiedener Kriterien) gegebenenfalls gelöscht.

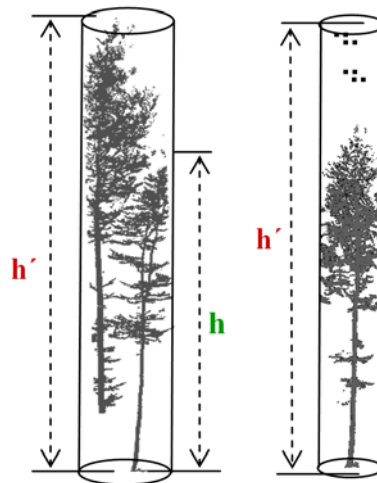


Abb. 4: Möglichkeiten der falschen Baumhöhenbestimmung im Baumzylinder

5.1 Baumdetektierung

Die 22 Plots der österreichischen Testgebiete beinhalten insgesamt 547 stehende Bäume. Nach der Vor- und Feinsegmentierung wurden 593 Objekte als Bäume klassifiziert. Darunter waren 533 erfolgreich detektierte Bäume, was einer Detektionsrate von 97,4 % entspricht. Dennoch konnten 14 Bäume nicht detektiert werden. Des Weiteren wurden 60 Bäumen zu viel detektiert. Abb. 5 zeigt die Detektionsfehler aufgeteilt nach den vorhandenen Baumarten im Plot.

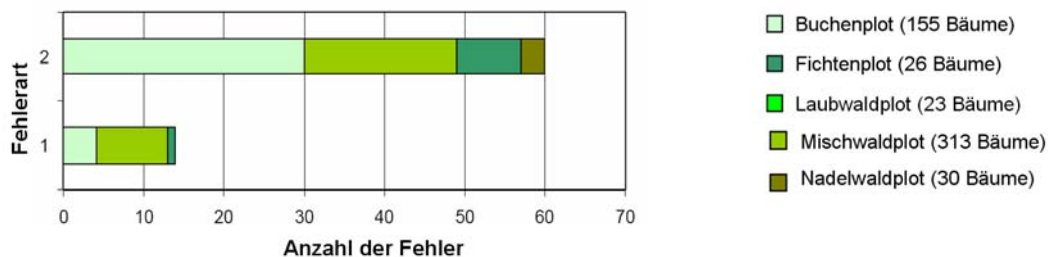


Abb. 5: Detektionsfehler

Im Single-Scan Datensatz des Buchenplotes konnten insgesamt 22 Objekte als Baum detektiert werden, was einer Detektionsrate von 100% und keinen Fehldetektierungen entspricht. Im Multiple-Scan hingegen wurden 26 Objekte als Baum klassifiziert. Unter den Objekten waren 20 korrekt detektierte Stämme. Zwei Bäume wurden nicht detektiert (= Fehler 1. Art) und sechs Objekte (Äste, Bodenvegetation = Fehler 2. Art) zu viel. Die nicht detektierten Bäume wurden teilweise durch Stämme und Äste anderer Bäume verdeckt, sodass die Anzahl der Punkte am Stamm die vorgegebene Mindestanzahl ($Anzahl_{min}$) in der Vorsegmentierung nicht erreichte und die Cluster zurückgewiesen wurden. Die meisten Objekte mit einem Fehler 2. Art werden durch eine spätere Stammverfolgung eliminiert. In Abbildung 6 ist ein Ausschnitt der Segmentierung im Buchenplot dargestellt.

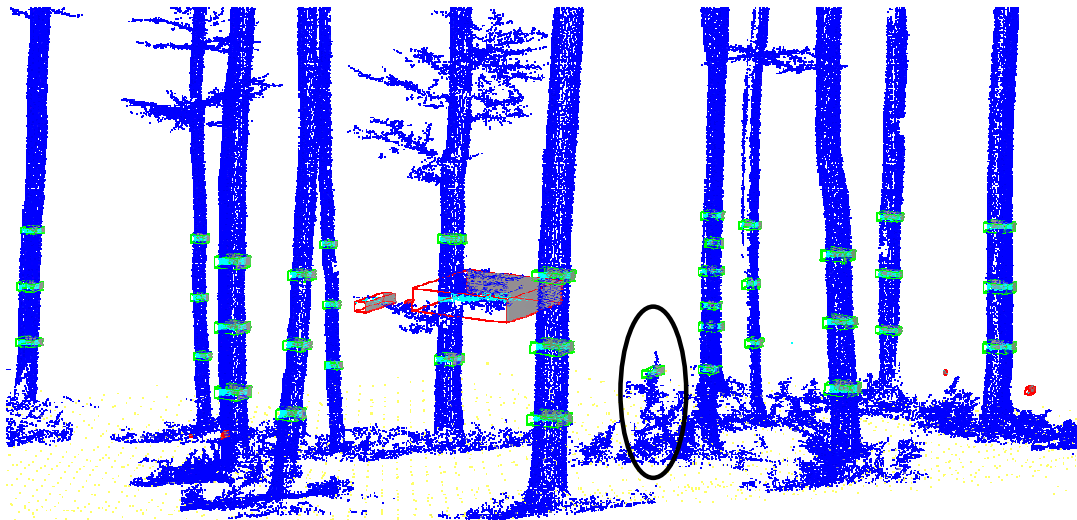


Abb. 6: Segmentierungsergebnis des Buchenplotes (Ellipse = Fehler 2. Art)

5.2 Baumhöhe

In Tabelle 1 und Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Baumhöhenanalyse zusammengefasst dargestellt. Von den insgesamt 50 gemessenen Baumhöhen der österreichischen Plots wurden 36 (72% - Mittel: 3,30 m) zu groß bestimmt. Die (maximale) Abweichung von 20,1 m trat bei einer Hainbuche auf. In diesem Fall beinhaltete der Baumzylinder Kronenpunkte eines größeren benachbarten Baumes. Die Vermutung, dass durch mehrere Standpunkte eine Verbesserung in der Baumhöhenbestimmung möglich ist, konnte an dem Buchenplot Datensatz bestätigt werden. Bei 13 von 22 Bäumen kam es im Multiple-Scan zu einer verbesserten Höhenbestimmung. Dennoch sind die Ergebnisse der Baumhöhenbestimmung nicht zufriedenstellend.

Tab. 1: Zusammenstellung der Analyse der Baumhöhen

Plot	Österreichische Plots	Buchenplot	
	Single-Scan	Single-Scan	Multiple-Scan
Aufnahmekonfiguration	Faro	Riegl	Riegl
Scanner	Faro	Riegl	Riegl
Mittelwert	3,30 m	1,47 m	0,90 m
RMS-Fehler	6,73 m	4,10 m	3,99 m
Maximum	20,10 m	11,70 m	11,50 m
Minimum	-0,10 m	0,30 m	0,10 m

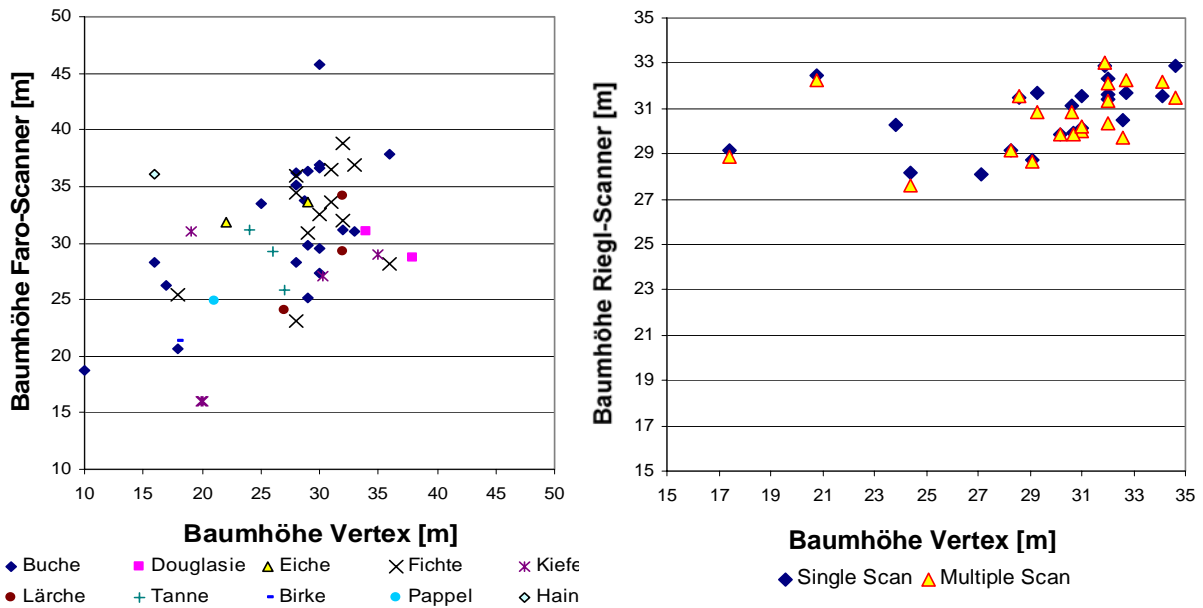


Abb. 7: Ergebnisse der Baumhöhenbestimmung nach Baumarten (links) und nach Aufnahmekonfiguration im Buchenplot (rechts)

5.3 Baumfußpunkte

Um eine Genauigkeitseinschätzung der Brusthöhenbestimmung vorzunehmen, wurden die automatisch ermittelten Baumfußpunkte aus dem Single-Scan mit den tachymetrisch bestimmten Baumfußpunkten verglichen. Dabei ergab sich eine maximale Abweichung von 24,4 cm und eine minimale Abweichung von -0,04 cm (Abb. 8), sowie eine Standardabweichung von $\pm 6,91$ cm. Im Mittel wurden die Baumfußpunkte 1,93 cm oberhalb des tatsächlichen Fußpunktes bestimmt. Das heißt, der automatisch bestimmte Baumfußpunkt befindet sich über dem realen Fußpunkt, was einen zu hohen BHD-Ansatz im Vergleich zu manuellen Messungen zur Folge hat. 16 von 22 Fußpunkten wiesen eine Abweichung kleiner 5 cm auf.

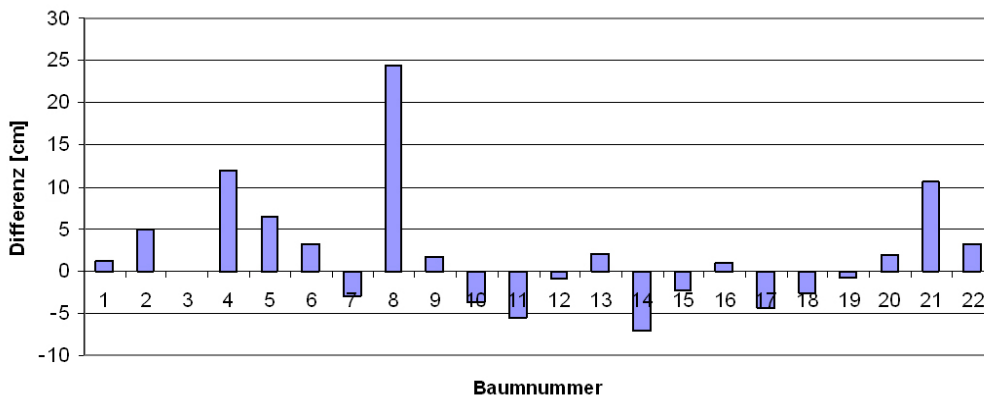


Abb. 8: Baumfußpunktabweichung [cm] (automatische Fußpunktbestimmung – Tachymetermessung)

6 Diskussion und Ausblick

Im Single-Scan Modus sind größere Verdeckungen, verursacht durch Äste und dichtes Unterholz, im Stammbereich nicht auszuschließen. Daher wird die Segmentierung in verschiedenen Schnitten durchgeführt. Verdeckungen durch Bäume (Scanschatten der Bäume) können durch die Anwendung von mehreren Schnitthöhen nur teilweise kompensiert werden. Verläuft die Stammachse schief (quer zur Richtung Scanner – Baum), ist die Wahrscheinlichkeit gegeben, dass in einem der drei Schnitte Stammpunkte eines dahinterliegenden Baumes erfasst werden können. Bei spezieller regelmäßiger Bepflanzung in Baumplantagen, ist ein weiterer Aufnahmestandpunkt unumgänglich, um alle Bäume zu erfassen. Dabei ist die Positionierung mehrerer Standpunkte innerhalb des Plotes vorteilhaft, da nur Bäume innerhalb des Plotes Verdeckungen verursachen können. Wird der Scanner außerhalb des Plotes platziert, erhöht sich die Anzahl der Bäume (zwischen Scanner und Plotgrenze) und somit die Wahrscheinlichkeit von Verdeckungen.

Bäume mit einem stärker geneigten Stamm in Aufnahme­richtung oder gebrochene schief stehende Stämme, können nur bedingt detektiert werden. Das Stammsegment im 2D-Schnitt wird hierbei nicht mehr kreisförmig dargestellt, was zum einen zur Zurückweisung des Punktclusters in der Kreisausgleichung führt (Vor- und Feinsegmentierung) und zum anderen eine zu geringe Punktdichte in den Rastermaschen der Feinsegmentierung bewirkt. Um dennoch stark geneigt Stämme zu detektieren ist anstatt des Einpassens eines Kreises ein Zylinderfitting (PFEIFER et al., 2004) notwendig, was Gegenstand von zukünftigen Arbeiten sein wird.

Mehrere Aufnahmestandpunkte führen zu einer Minimierung der Verdeckungen, was eine verbesserte Baumhöhenbestimmung bewirkt (Tab. 1). Die Ergebnisse der 22 Plots zeigen, dass die Baumhöhe tendenziell zu groß bestimmt wurde. Ursache dafür sind neben den Geisterpunkten, die trotz vorheriger Filterung enthalten waren, Äste benachbarter Bäume. Um den Einfluss benachbarter Baumpunkte zu umgehen, kann der Zylinderradius verkleinert werden. Allerdings führt dies dazu, dass bei schrägen Bäumen die Baumspitze außerhalb des Zylinders liegt. Ein vermutlich besseres Ergebnis erhält man, indem die Baumachse kontinuierlich verfolgt wird. Somit wird der Suchbereich eingegrenzt und Punkte benachbarter Bäume ausgeschlossen. Bei kleineren Bäumen, welche komplett von größeren Bäumen überschattet werden, ist eine Höhenbestimmung mit dieser Methode ausgeschlossen. Zukünftige Arbeiten beschäftigen sich mit der Astverfolgung in Laserscannerpunkt­wolken. Somit können Astpunkte benachbarter Bäume bei der Höhenbestimmung erkannt und eliminiert werden.

7 Literaturverzeichnis

- ASCHOFF, T.; THIES, M.; WINTERHALDER, D.; KRETSCHMER, U.; SPIECKER, H., 2004: Automatisierte Ableitung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten. 24. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF 2004, Halle/Saale, S. 341-348.
- BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E.; MOHAN, F.; NUGENT, C., 2007: Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laserscanner point clouds.

- International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI, Part 3/ W52, 2007, S. 50-55.
- FARO EUROPE GMBH & Co. KG, 2005: Aufbruch in neue Dimensionen: der FARO Laser Scanner LS. Laser Scanner LS Broschüre, 2005
- HOPKINSON, C.; CHASMER, L.; YOUNG-POW, C.; TREITZ, P., 2004: Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. Canadian Journal of Forest Research, 34, 2004, S. 573-583.
- KIRÁLY, G. & G. BROLLY, 2007: Tree height estimation methods for terrestrial laser scanning in a forest reserve. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI, Part3/ W52, 2007, S. 211-215.
- KRETZSCHMAR, A., 2007: Untersuchungen zur Genauigkeit bei der Ableitung von Baumparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten. Studienarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden 2007
- PFEIFER, N.; B. GORTE; D. WINTERHALDER, 2004: Automatic Reconstruction of Single Trees From Terrestrial Laser Scanner Data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXV, Part B5, 2004, S. 114-119
- RIEGL Laser Measurement System GmbH, 2006: Long Range & High Accuracy 3D Terrestrial Laser Scanner System LMS-Z420. <http://www.riegl.com>, 09/2006
- SHELLER, S. & D. SCHNEIDER, 2006: Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktwolken zur Rekonstruktion von Tragwerken. Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2006, Hrsg. Luhmann/Müller), Verlag Herbert Wichmann, Heidelberg, S. 156-163.
- THIES, M.; ASCHOFF, T.; SPIECKER, H., 2003: Terrestrische Laserscanner im Forst. Allgemeine Forstzeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge, Nr. 22/2003, S. 1126-1129.

Danksagung

Unser Dank gilt der Firma Treemetrics Ltd. aus Cork/Irland für die Aufnahme und Bereitstellung der Scandaten der Plots aus Österreich. Des Weiteren wollen wir uns bei Bernhard Posch von der „Österreichische Bundesforste AG“ und Matthias Menzel vom Institut für Forstökonomie und Forsteinrichtung / TU Dresden für die Baumhöhenmessungen bedanken.