

Der dreidimensionale Wald

Laserscanning als Hilfsmittel für die forstliche Planung

Bernhard Maier & Markus Hollaus

Flugzeuggetragenes Laserscanning ist ein Verfahren zur Vermessung der Erdoberfläche. Es beruht auf der Abtastung der Oberfläche mit Laser-Strahlen, deren Reflexionsimpulse in dreidimensionale Koordinaten und somit 3D-Punktwolken umgerechnet werden. Ein Hektar Wald wird mit bis zu 40.000 Punkten dreidimensional beschrieben. In Vorarlberg wurde in den Jahren 2002-2005 durch das Landesvermessungsamt die gesamte Landesfläche mittels Laserscanning erfasst. Damit ist Vorarlberg das erste Bundesland in Österreich, das über flächendeckende Laserdaten verfügt und gilt als Vorreiter auf diesem Gebiet. Dieser Artikel erläutert die Funktionsweise dieser Fernerkundungs-Technologie und diskutiert die Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der forstlichen Planung und der Waldinventur. Die Anwendungsbeispiele konzentrieren sich auf den Gebirgswald und stehen schwerpunktmäßig im Kontext seiner Schutzfunktion.

Funktionsprinzip des Laserscannings

Beim flugzeuggetragenen Laserscanning ist der Sensor im Flugzeugboden eingebaut und sendet einen stark gebündelten Lichtstrahl aus. Dieser wird zum Teil bereits am Kronendach reflektiert (first echo). Teile dieses Strahls dringen aber zwischen Baumkronen und Ästen hindurch und werden später vom Waldboden reflektiert (last echo). Eine im Flugzeug eingebaute Empfangseinheit registriert die reflektierten Lichtimpulse (siehe Abbildung 1). Aus der Zeitdifferenz zwischen Aussendung und

Empfang des Lichtimpulses kann die Entfernung zwischen Sensor und reflektierendem Objekt (z.B. Waldboden, Äste, Baumkronen, etc.) berechnet werden. Ein differentielles globales Positionierungssystem (dGPS) sowie Neigungsmesser im Flugzeug zeichnen die exakte Lage des Sensors während der Befliegung auf. Aus diesen Messdaten werden die exakten Positionen im Raum berechnet. Als Rohprodukt einer Laserscannerbefliegung erhält man eine dreidimensionale Punktwolke, aus welcher digitale Geländemodelle (DGM) und digitale Oberflächenmodelle (DOM) berechnet werden können. Für die Berechnung eines DGMs werden die „last-echo“-Daten herangezogen, wobei in einem ersten Schritt die Klassifizierung der Punktwolke in Boden-(Gelände-)Punkte und „Nicht-Boden“-Punkte durchgeführt werden muss. Das DOM beschreibt hingegen die oberste Fläche aus der Sicht des Flugzeuges und wird aus den „first-echo“-Daten berechnet. Diese Modelle weisen beispielsweise in Vorarlberg eine Rasterauflösung von 1 m auf. Die Differenz aus diesen beiden Oberflächen ergibt das normalisierte Oberflächenmodell ($nDOM = DOM - DGM$), welches im Wald oft auch als normalisiertes Kronenmodell (nKM) bezeichnet wird (siehe Abbildung 2). Die mittlere Höhen Genauigkeit des DGM hängt von der Punktdichte und der Geländeneigung ab und liegt bei ± 15 cm. Ein weiterer großer Vorteil des Laserscannings ist die Unabhängigkeit von der Sonnenbeleuchtung, wodurch keine Schattenbereiche entstehen, welche eine

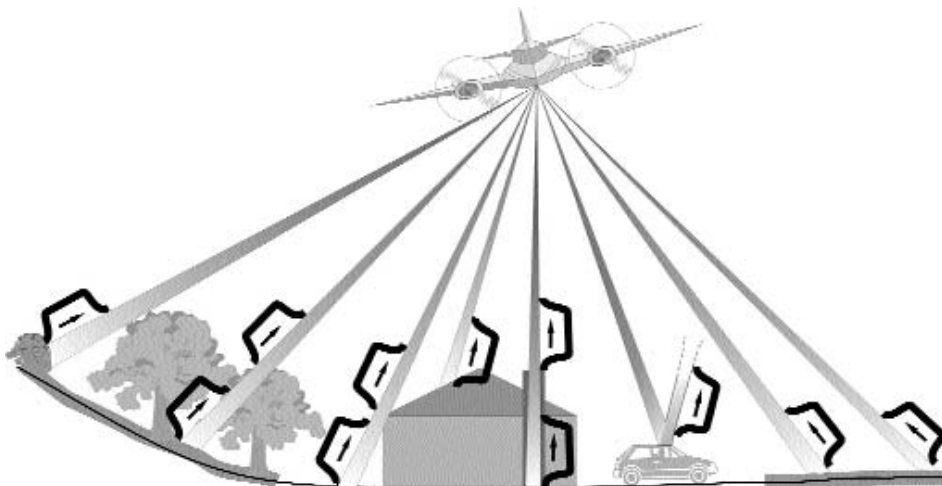


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines „first-/last-Echo“ Laserscanner Systems. Die blauen Pfeile stellen die verschiedenen Arten von Reflexionen bzw. Teilreflexionen der Laserimpulse dar.

Vorarlberg ist Vorreiter:

In Vorarlberg wurde in den Jahren 2002-2005 durch das Landesvermessungsamt die gesamte Landesfläche mittels Laserscanning erfasst. Damit ist Vorarlberg das erste Bundesland in Österreich, das über flächendeckende Laserdaten verfügt und gilt als Vorreiter auf diesem Gebiet. Im Zuge eines Projektes der TU Wien (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) mit der Landesforstdirektion, dem Landesvermessungsamt und dem Stand Montafon Forstfonds wird gegenwärtig untersucht, ob das für das innere Montafon entwickelte Holzvorratsschätzmodell für das gesamte Bundesland Vorarlberg und somit auch für andere Waldtypen anwendbar ist. Dazu werden wir in der nächsten Ausgabe der Waldzeitung berichten.

forstliche Auswertung der Daten erschweren bzw. unmöglich machen. Das dreidimensionale Kronenmodell ermöglicht nicht nur eine Draufsicht wie beispielsweise in einem Orthophoto, sondern lässt uns auch in den Wald hineinblicken. Dieser Zugang zur vertikalen und horizontalen Struktur des Waldes eröffnet neue Möglichkeiten im Waldmonitoring und der forstlichen Planung, die nun auszugsweise anhand von Beispielen aus dem Montafon beleuchtet werden.

Holzvorratsschätzung

Mit Hilfe von Laserscanning wird es möglich, den Holzvorrat flächendeckend mit einer stark reduzierten Anzahl von Waldinventur-Stichproben zu schätzen. Dazu wird der vom nKM umschriebene Kronenraum in drei Höhenschichten eingeteilt, die als Eingangsdaten in eine lineare Regressionsanalyse dienen. Zur Kalibrierung des Schätzmodells werden die Waldinventurstichproben verwendet. Im Fichten-dominierten inneren Montafon konnten mit dieser Methode praxistaugliche Ergebnisse erzielt werden. Ein Vergleich mit den Waldinventurdaten hat ergeben, dass sich der geschätzte vom gemessenen Holzvorrat um lediglich 1% unterscheidet. Zusätzlich zur Abschätzung des Holzvorrates lässt sich

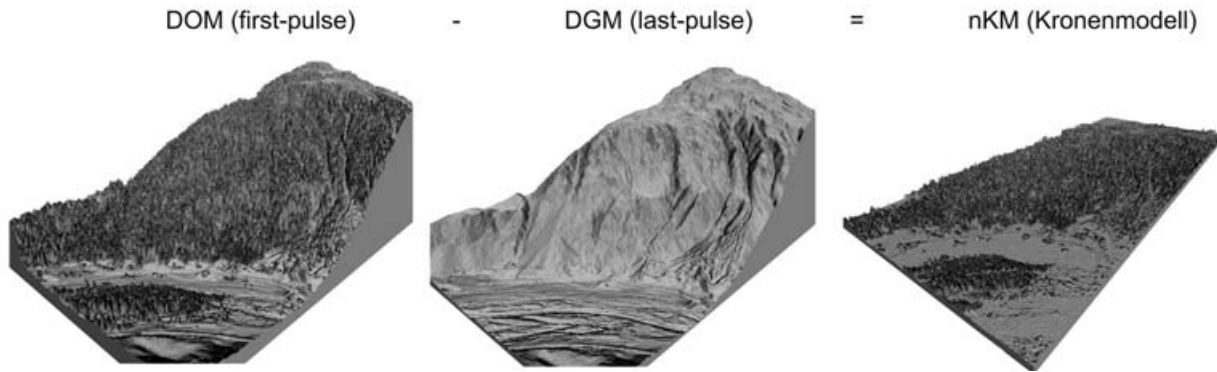


Abbildung 1: Durch die Subtraktion des Geländemodells vom Oberflächenmodell erhält man das normalisierte Kronenmodell (Bestandeshöhenmodell).

dieses Modell auch zur Ermittlung des Kohlenstoffgehaltes heranziehen. Als Referenzdatensatz dient hierbei anstatt des Holzvorrates der für jede Stichprobenfläche berechnete Kohlenstoffanteil. Im Hinblick auf die im Rahmen des Kyoto-Protokolls zu erbringenden Berichte gewinnt ein derartiges flächiges Schätzmodell an Bedeutung.

Waldstruktur

Die horizontale Baumverteilung und die vertikale Schichtung sind Schlüsselfaktoren für die Erfüllung der vielfältigen Funktionen des Gebirgswaldes. Zur Strukturanschätzung wird das nKM in homogene Baumhöhenbereiche gegliedert und in weiterer Folge gemäß der Bestandeshöhe in vier verschiedene Höhenklassen eingeteilt (siehe Abbildung 3). Durch diese räumliche Abgrenzung der verschiedenen Baumhöhenbereiche kann sowohl die horizontale als auch die vertikale Struktur abgebildet werden. Durch diese Klassifizierung lassen sich auf einfache Art und Weise der Kronen-Schlussgrad der einzelnen Höhenschichten und auch des Gesamtbestandes ermitteln. In weiterer Folge wird die Schichtung der Bestände angesprochen oder die strukturelle Vielfalt anhand von Strukturindizes beschrieben. Eine Einteilung in Waldstrukturtypen ermöglicht Rückschlüsse zur Waldentwicklungsphase eines Bestandes. Ein Nachteil dieses Auswerteansatzes liegt aber darin, dass das Kronenmodell nur durch eine Oberfläche beschrieben wird und somit überschirmte Unter- und Zwischenschichten unberücksichtigt bleiben. Um diesen Nachteil wettmachen zu können, müsste die Einteilung in die Waldstrukturtypen anhand der dreidimensionalen Laserpunktwolke (Rohdaten) erfolgen.

Bestandeslücken

Die oben beschriebene Höhenklassifizierung des nKM trennt gleichzeitig Waldflächen von unbestockten Flächen. In einer solchen Ausscheidung wird das für den subalpinen Fichtenwald typische Mosaik von Baumkollektiven und baumlosen Lücken sichtbar. Gerade auf steilen Hängen gelten Bestandeslücken als potentielle Lawinenanrissgebiete. Überlagert man diese Bestandeslücken mit einer Hangneigungskarte, die aus dem Laserscanning-Bodenmodell (DGM) berechnet wird, kann das Lawinenrisiko anhand von Lückenlänge und Hangneigung vorab grob eingestuft werden. Dies ermöglicht einen raschen Überblick des Gefahrenpotentials auf großer Fläche (Revier, Gemeinde) und ergänzt die Experten-Ansprache vor Ort bzw. macht diese effizienter.

Einzelbaumerkennung

Für die automatische Einzelbaumerkennung sind grundsätzlich höhere Punktdichten erforderlich, als in Vorarlberg gegenwärtig zur Verfügung stehen. Dennoch lassen sich mit Hilfe von Lokale-Maxima Filter (LM-Filter) die vorherrschenden Stämme aus dem nKM identifizieren. Die Einzelbaumerkennung ist bei Nadelhölzern einfacher, da diese meist ausgeprägte kegelförmige Kronen ausbilden. Laubbäume hingegen lassen oft keinen ausgeprägten höchsten Punkt, sondern mehrere lokale Maxima (LM) entstehen. Im Zuge eines Methodentests wurde auf einem steilen Montafoner Schutzwaldhang versucht, einzelne Bäume im nKM zu identifizieren und mit Waldin-

venturstichproben zu vergleichen. Als Ergebnis ließen sich knapp 2/3 aller Bäume aus dem nKM identifizieren. Die Größe des LM-Filters wurde dabei anhand der Baumhöhe variiert. Bei den nicht identifizierten Bäumen handelt es sich entweder um sozial unterdrückte Stämme oder um überschirmte Rottenbäume. Die Ursachen für fehlerhaften Einzelbaum-Detektionen liegen meist darin, dass eine Krone wegen ausladender Äste mehrere lokale Maxima aufweist, oder dass zwei oder mehrere Bäume zu einer Krone verschmelzen (siehe Abbildung 4b). Letzteres ist insbesondere bei der für den subalpinen Fichtenwald typischen Rottenstruktur häufig der Fall.

Baumhöhenermittlung

Nach Identifikation der Wipfelpunkte im Rahmen der Einzelbaumerkennung lässt sich die Baumhöhe einfach durch Ablesen des Höhenwertes im Kronenmodell ermitteln. Die Höhenmessgenauigkeit liegt nach Vergleichen im Montafon im Mittel bei ca. einem halben Meter. Gewöhnlich wird die Baumhöhe durch Laserscanning

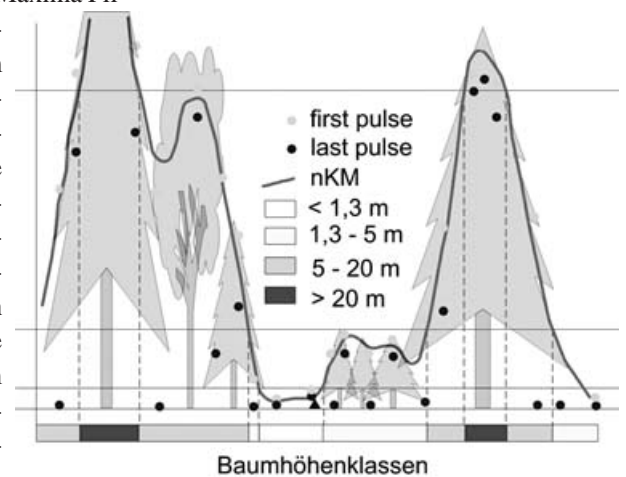


Abbildung 3: Gliederung des nKM in Baumhöhenklassen

leicht unterschätzt, was zwei Ursachen hat. Zum einen ist es bei einer Punktdichte von 1 Punkt pro m² und einem Laserstrahl-Durchmesser von 30 cm durchaus möglich, dass nicht die Baumspitze direkt von einem Laserstrahl getroffen wird, sondern beispielsweise die Höhe einer Baumschulter reflektiert wird. Zum anderen wird der Laserstrahl erst ab einer gewissen Vegetationsdichte in der Krone reflektiert, welche nicht direkt an der Baumspitze, sondern erst bei den obersten Astquirlen erreicht wird. Eine bedeutende Fehlerquelle für die Baumhöhenableitung stellt die Genauigkeit des Geländemodells dar. Unschärfen im Geländemodell, wie sie insbesondere bei bewegtem Kleinrelief im Gebirgswald möglich sind, schlagen sich auch im nKM und somit in den Baumhöhen nieder. Wie aus Abbildung 4a ersichtlich ist, stimmt die Lage der detektierten lokalen Maxima manchmal nicht mit den terrestrisch eingemessenen Baumstandpunkten überein, was meist auf das schräge Wachstum der Bäume zurückzuführen ist. Bei schräg stehenden Bäumen befindet sich das im nKM detektierte LM nicht lotrecht über dem Stammfuß, was bei steiler Hanglage zu Über- oder Unterschätzung der Baumhöhe führt.

Bedeutung für die Forstpraxis und Ausblick

Was die praktische Brauchbarkeit für schutzwaldtechnische Planungen und Inventuren anbelangt, ist festzuhalten, dass die Baumhöhenermittlung mittels Laserscanning im Genauigkeitsbereich der manuellen Messung im Wald liegt. Der große Nutzen von Laserscanning in diesem Zusammenhang liegt vor allem in der flächen-

deckenden und nicht auf Stichproben begrenzten Verfügbarkeit der Baumhöhen, wodurch auch die Ermittlung der Oberhöhe eines Bestandes deutlich erleichtert wird. Die arbeitsintensive Baumhöhenmessung kann mittels Laserscanning weitestgehend automatisiert werden.

Die Stammzahl lässt sich mit Laserscanning bei den derzeit üblichen Punktdichten von einem bis vier Punkten pro m² nur unzureichend ermitteln und entspricht nicht den praktischen Ansprüchen. Mit Hilfe von ertragskundlichen Beziehungen kann vom Kronendurchmesser oder der Baumhöhe auf den Brusthöhendurchmesser geschlossen werden. Da jedoch mittels LM-Filter vornehmlich dominante Bäume identifiziert werden, kann von diesen allein nicht direkt die Durchmesser- und Stammzahlverteilung des Bestandes abgeleitet werden. Es ist denkbar, Stammzahl und Durchmesser- und Stammzahlverteilung über Referenzverteilungen in verschiedenen Bestandesstrukturtypen und Waldentwicklungsphasen zu schätzen. Dies ist aber noch Gegenstand der Forschung.

Die Resultate der Holzvorratsschätzung liegen im Genauigkeitsbereich der terrestrischen Waldinventur. Obwohl Stichproben zur Kalibrierung benötigt werden, kann jedoch mit einem ausgedünnten Netz (z. B. 500 m Abstand) an Stichproben das Auslangen gefunden werden. Die lokale Aussagegenauigkeit wird dadurch deutlich erhöht, was zu einem Kostenvorteil in einer Waldinventur führt. Im Zuge eines Projektes der TU Wien (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) mit der Landesforstdirektion, dem Landesvermessungsamt und dem Stand Montafon Forstfonds wird gegenwärtig untersucht, ob das

entwickelte Schätzmodell für das gesamte Bundesland Vorarlberg und somit auch für andere Waldtypen anwendbar ist. Dazu werden wir in der nächsten Ausgabe der Waldzeitung berichten.

Wie werden Laserscanning Daten neben den genannten Beispielen beim Stand Montafon noch eingesetzt? Sie ergänzen primär das Orthophoto als Hintergrund der Arbeits- und Bestandeskarten. Gerade auf steilen Nordhanglagen, wo Orthophotos auf Grund des Schattenwurfs unbrauchbar sind, zeigen Laserdaten die realen Gelände- und Übershirmungsverhältnisse weit besser. Das Laserscanning Geländemodell bringt eine ganze Reihe von Vorteilen mit sich. Präzise Topographiekarten sind in der Erschließungsplanung mit Forststraßen und Seilkrananlagen dienlich. Selbst kleinste Gräben und Runsen zeichnen sich im Geländemodell ab, was nicht nur die Orientierung im Wald enorm erleichtert, sondern auch das Prozessverständnis im Kontext von Naturgefahren fördert.

Zusammenfassend betrachtet, stellt Laserscanning ein probates Hilfsmittel und eine wertvolle Ergänzung terrestrischer Aufnahmeverfahren dar. In Zukunft werden die kontinuierlich aufzeichnenden „full-wave“ Laser-Systeme weitere Möglichkeiten eröffnen, die Struktur des Waldes detaillierter und genauer zu erfassen. Auch die direkte Kombination der Laserscanning Messungen mit multispektralen Sensoren erscheint im Hinblick auf die Unterscheidung von Baumarten und Einschätzung der Vitalität sehr vielversprechend. Großes Potential bietet Laserscanning weiters bei der Erkennung von zeitlichen Veränderungen. So können Zuwächse auf Basis der Höhenveränderungen festgestellt werden. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Aufnahme- und Messtechnologie technisch bereits sehr ausgreift ist, die praxistaugliche thematische Auswertung und Veredelung der erfassten Laserscanning-Daten allerdings vielfach noch in den Kinderschuhen stecken.

Ing. Bernhard Maier, Stand Montafon Forstfonds, 6780 Schruns, bernhard.maier@stand-montafon.at

Dr. Markus Hollaus, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, 1040 Wien, Österreich, mh@ipf.tuwien.ac.at



Abbildung 4a: Fehlerquelle durch schräg stehende Bäume



Abbildung 4b: Bei Rotten lassen sich die Kronen der einzelnen Bäume nur schwer trennen