

Terrestrische Laserscanner im Forst

Von Michael Thies, Tobias Aschoff und Heinrich Spiecker, Freiburg

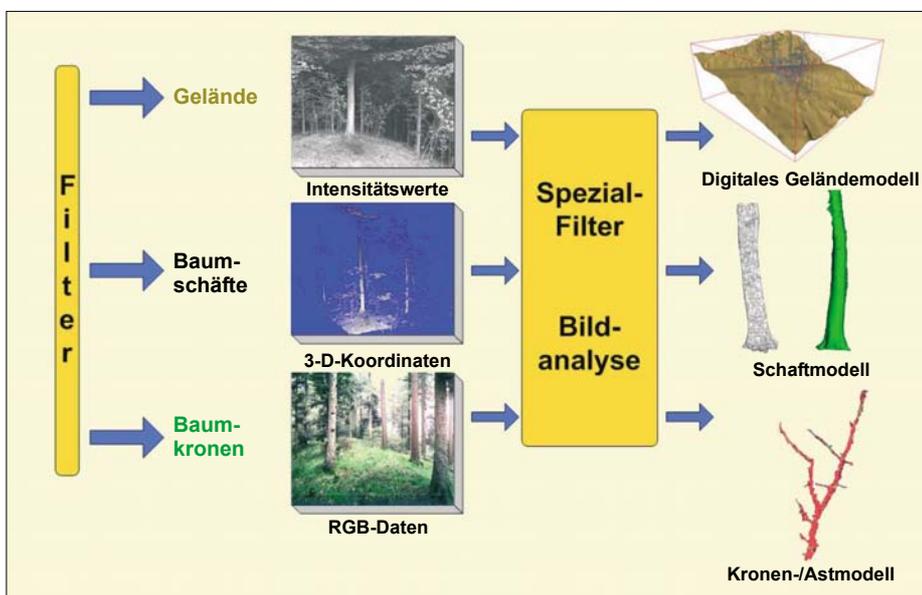
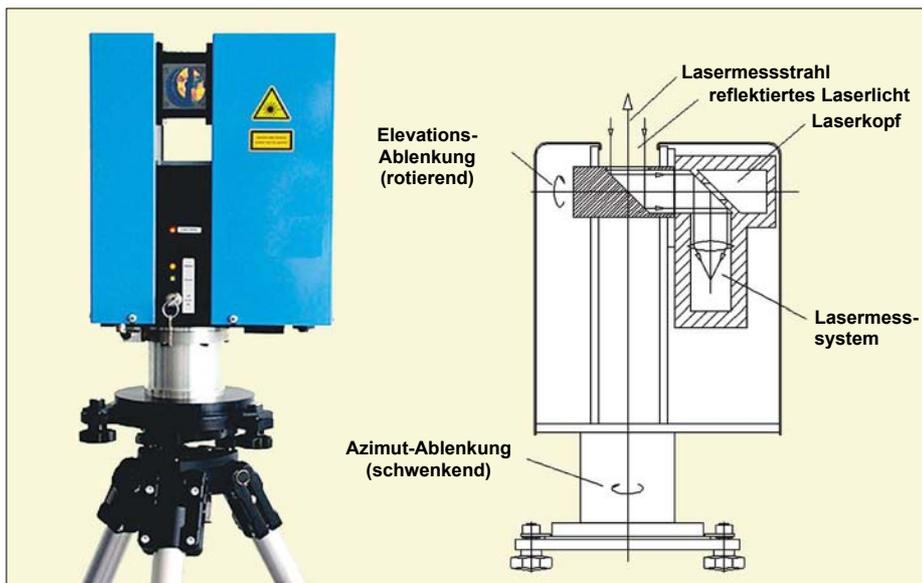
Laserscanner haben in den Bereichen Architektur, Industrieanlagenbau und Denkmalschutz bereits große Bedeutung erlangt. Der folgende Beitrag beschreibt die Einsatzmöglichkeiten dieser neuartigen Vermessungsgeräte für die Durchführung forstlicher Inventuren und forstwissenschaftliche Datenerhebungen. Hauptmotivation für die Prüfung der Einsatzmöglichkeiten terrestrischer Laserscanner ist die Vermessung von Kenngrößen, die auf herkömmliche Weise nur angenähert gemessen oder gar nur geschätzt werden konnten. Hierzu zählen insbesondere Parameter, die die äußerlich erkennbare Holzqualität beschreiben (z.B. Krümmung, Abholzigkeit, Ovalität oder Astnarben an stehenden Bäumen). Darüber hinaus können neue Informationen, wie z.B. die Ermittlung der oberirdischen Biomasse durch die Vermessung der Verzweigungsstruktur, genauer erfasst werden und z.B. verschiedenen vertikalen Schichten zugeordnet werden.

Gerätebeschreibung und Messprinzip

Der grundlegende Aufbau eines terrestrischen Laserscanners wird am Beispiel des im Rahmen des „natscan“-Projektes eingesetzten Gerätes erläutert [1], da dieser als repräsentativ für die verschiedenen auf dem Markt befindlichen Geräte gelten kann. Ein Laserscanner ist hinsichtlich der äußeren Abmessungen einem Theodoliten vergleichbar, weist aber z.z. noch ein höheres Gewicht auf. Während der Vermessung dreht sich der Scanner in horizontaler Richtung um 360°. Ein vertikal rotierender Spiegel lenkt den augensicheren Laserstrahl ab und ermöglicht die Aufnahme eines vertikalen Sichtfeldes von 310° (s. Abb. 1). Durch die gleichzeitige Drehung des Scannerkopfes und des Spiegels wird es ermöglicht, nahezu alle Raumrichtungen mit Ausnahme eines Kegels unterhalb des Scanners zu vermessen.

Sofern der gesendete Laserstrahl von einem Gegenstand (Baum, Ast, Laub, Geländeoberfläche) reflektiert und von dem Gerät wieder empfangen wird, werden die Entfernung, der jeweilige horizontale und vertikale Winkel und die Intensität des vom Gegenstand reflektierten Laserlichtes digital gespeichert. In horizontaler Richtung werden auf diese Weise bis zu 36.000 und in vertikaler Richtung 15.000 Punkte gemessen.

Die durchschnittliche Dauer des Messvorganges beträgt je nach Höhe der Messpunktdichte und der Größe des Geländeausschnittes zwischen 1,5 und 5 Minuten. Die Entfernung wird nach dem Phasendifferenzverfahren bestimmt, d.h. aus der Verschiebung des Send- und Empfangssignals des Laserlichtes [2, 3].



FR M. Thies ist Assistent am Institut für Waldwachstum der Universität Freiburg, Mitarbeiter und Koordinator des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojektes „natscan“. Dipl.-Ing. T. Aschoff ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im gleichen Projekt und Institutsdirektor Prof. H. Spiecker ist der verantwortliche Projektleiter.

Abb. 1 (oben): Laserscanner mit Stativ (links) und Schemazeichnung der Hauptbestandteile der Vermessungseinrichtung (rechts, vereinfacht nach [2])

Abb. 2 (unten): Ablauf der Datenauswertung für forstliche Fragestellungen (Objektklassifizierung)

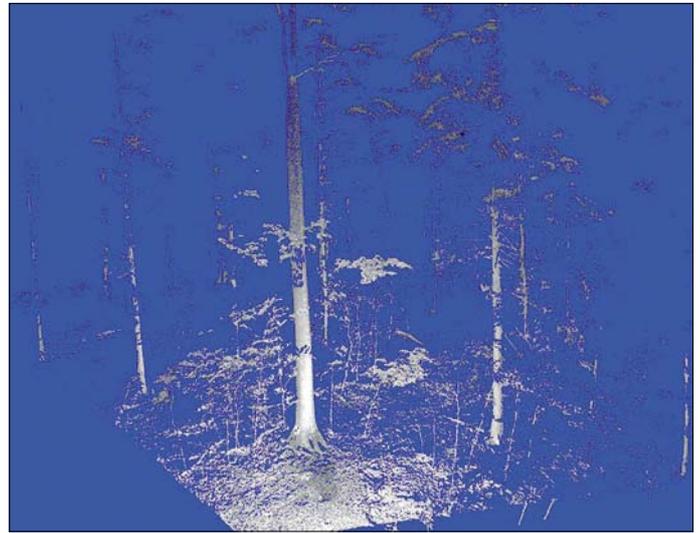


Abb. 3: Ergebnisse des Vermessungsvorgangs: Intensitätsbild (links) und Punktwolke der dreidimensionalen Koordinaten (unten aus anderem Blickwinkel)

Der große Vorteil dieses Messprinzips liegt in der hohen Genauigkeit, so beträgt die Strahldivergenz der Entfernungsmessung $< 0,3$ mrad, d.h. in 50 m Entfernung beträgt der Durchmesser des Lasermesspunktes maximal 1,9 cm. Die Entfernungsgenauigkeit bis zu dieser Distanz liegt im Millimeter-Bereich [2].

Ein Nachteil ist darin zu sehen, dass nur innerhalb der ersten Phasenlänge eine eindeutige Zuordnung möglich ist. Punkte, die weiter entfernt liegen als die definierte Wellenlänge werden in den ers-

ten Eindeutigkeitsbereich reflektiert und daher mit einer falschen Entfernung gespeichert. Der im natscan-Projekt verwendete Scanner verfügt über einen Eindeutigkeitsbereich von 53,5 m. Bei der Aufnahme von Waldbeständen muss generell zwischen zwei Vorgehensweisen unterschieden werden:

a) Single-Scan-Modus: Der Scanner wird in der Mitte eines interessierenden Stichprobenpunktes in einem Waldbestand aufgestellt und es wird ein 360°-Panorama vermessen.

b) Multiple-Scan-Modus: Der Laserscanner wird an mehreren Stellen um den Stichprobenmittelpunkt herum platziert und es ergibt sich im Zentrum ein Überlappungsbereich, für den Informationen aus mehreren Richtungen vorliegen. Bei dieser Vorgehensweise müssen Passpunkte (Targets) so angebracht werden, dass sie von möglichst vielen Scannerstandpunkten aus einsehbar sind. Mithilfe dieser Fixpunkte, die gegenwärtig noch tachymetrisch eingemessen werden müssen, ist es möglich, die Einzelscans zu registrieren, d.h. hinsichtlich ihrer Lage zueinander auszurichten.

Dem ersten, einfacher durchzuführenden Modus wird sicherlich der Vorzug zu geben sein, wenn die Vermessung einer Vielzahl von Probepunkten im Mittelpunkt des Interesses steht.

Der große Vorteil der zweiten Vorgehensweise besteht darin, dass vollständige dreidimensionale Abbilder der jeweiligen Bestandesausschnitte rekonstruiert werden können. Hinsichtlich der begrenzenden Faktoren für die Nutzbarkeit von Laserscannern im Außenbereich sind gegenwärtig Umgebungstemperaturen in einer Spanne von 0 bis 40 °C möglich. Der Stromverbrauch des gesamten Messaufbaus beträgt ca. 80 W, d.h. mit einem Akkusatz kann gegenwärtig ca. 5 Stunden (reine Messzeit) gearbeitet werden [4].

Ein Laserscanner ist darüber hinaus unabhängig von den Lichtverhältnissen, d.h. theoretisch könnten die Messungen auch in tiefster Dunkelheit durchgeführt werden [3]. Bedingt durch die vielfältigen Reflexionen in belaubten Waldbeständen, die dazu führen, dass wesentliche Einzelbaummerkmale wie z.B. der Schaft oder die Kronenarchitektur verdeckt werden, empfiehlt sich in vielen Fällen eine Datenaufnahme im unbelaubten Zustand, d.h. im Winterhalbjahr.

Messergebnisse

Die Rohdaten als Ergebnis der Laservermessung werden in großen Dateien gespeichert (bis zu 250 MB je Aufnahme 40 Mio Raumpunkten) und enthalten fortlaufende Koordinaten von Messpunkten sowie die Intensität der reflektierenden Oberfläche, sodass dunkle, schlecht reflektierende Flächen schwarz dargestellt werden und helle, gut reflektierende Flächen weiß [2, 5]. Diese Darstellung ist dem menschlichen Auge sehr vertraut, da sie weitgehend einem Schwarzweiß-Foto entspricht.

Die Intensitätsbilder (s. Abb. 3, links) können unmittelbar aus den Rohdaten erzeugt und nach Abschluss der Aufnahme auf dem Notebook-Monitor ausgegeben werden, sodass direkt eine optische Fehlerprüfung durchgeführt werden kann. Die Geometrie eines Waldbestandes kann durch die Darstellung der räumlichen Koordinaten als Punktwolke veranschaulicht werden (s. Abb. 3 rechts). Als dritte Darstellungsmöglichkeit bietet sich die Anzeige eines Entfernungsbildes an, bei dem jeder Entfernung ein Grauwert zugeordnet wird, sodass Objekte, die sich nahe am Scanner befinden, schwarz dargestellt werden und weit entfernte weiß.

Der große Datenumfang ist die Ursache für die Entwicklung der Laserscannertechnik parallel zu der Konstruktion leistungsfähiger Computer, die diese Datenmengen in akzeptabler Rechenzeit bearbeiten können [3]. Neuerdings wird auch

die Integration einer Panoramakamera in den gesamten Messaufbau angeboten, sodass dann nach einer Datenvorverarbeitung für jeden einzelnen gemessenen Punkt auch die drei Farbwerte rot, grün, blau (RGB-Daten) vorliegen.

Bearbeitung der erzeugten Daten

Im Mittelpunkt der Datenauswertung steht die Zuordnung von einzelnen Punkten zu konkreten Objekten (z.B. Schaft eines Baumes, Geländeoberfläche) in einem interessierenden Waldbestand. Dieser Vorgang wird Objektklassifizierung genannt. Da in der Regel bei forstlichen Inventuren je gegebener Zeiteinheit möglichst viele Stichprobenpunkte vermessen werden sollen, leitet sich daraus die Forderung ab, die Objektklassifizierung weitgehend automatisch durchzuführen. Hierin unterscheidet sich die Herangehensweise bei der forstlichen Auswertung von Laserscannerdaten erheblich von Auswertungen im Architektur-, Denkmalschutzbereich oder bei der Darstellung von Fabrikanlagen, bei denen etwas Wertvolles mit hoher Genauigkeit vermessen werden soll und entsprechend der Anteil interaktiver Auswertungen und damit einhergehend der zeitliche Aufwand größer sein kann. Für die themenspezifische Auswertung der Vermessungsdaten können die verschiedenen, im vorigen Abschnitt beschriebenen Ausgabeinformationen genutzt werden (Abb. 2).

Grundsätzlich erfolgt zunächst eine Filterung der Rohdaten und anschließend eine schrittweise Zuordnung der Koordinaten innerhalb der Punktwolke zu den einzelnen Objekten. Der verbleibende Datensatz wird jeweils um die bereits richtig erkannten Punkte (oder um das jeweilige daraus berechnete Modell) reduziert. Entsprechend ist es sinnvoll, die schwierigsten Objekte zum Schluss zuzuordnen. Für forstliche Fragestellungen können grob vier Objektkategorien gebildet werden: Gelände, Baumschäfte (bis zum Ansatz der grünen Krone), die Kronen der Bäume und schließlich sonstige in erster Näherung nicht zuzuordnende Objekte (wie z.B. Naturverjüngung, Felsen, Gräben, Wege), die aufgrund der Komplexität im Rahmen dieser Darstellung nicht erläutert werden.

Der große Datenumfang muss vor allem reduziert werden, um Rechenzeit einzusparen. Gleichzeitig dürfen jedoch keine wesentlichen Informationen verloren gehen, daher kann zunächst das Interessensgebiet eingeschränkt werden, so ist z.B. bei Betriebsinventuren nur das Gebiet innerhalb eines Radius von 12 m [6] relevant, sodass alle außerhalb liegenden Koordinaten entfernt werden können. Messpunkte, die eine geringe Intensität aufwei-

sen, werden entfernt, da mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass diese außerhalb des Eindeutigkeitsbereiches von 53,5 m liegen und Objekte darstellen würden, die real nicht vorhanden sind.

Nachfolgend werden so genannte „isolierte Punkte“ entfernt, d.h. Punkte, die innerhalb eines vom Benutzer wählbaren Abstandes keine Nachbarpunkte aufweisen können. Nach dieser allgemeinen Datenvorverarbeitung erfolgt die weitere Zuordnung der Koordinaten zu den drei wesentlichen Objekten im Wald unter Berücksichtigung der speziellen Objekteigenschaften. An Eingangsinformationen stehen die Intensitätswerte, die räumlichen Koordinaten und die RGB-Werte (d.h. rote, grüne und blaue Farbwerte) zur Verfügung.

Darüber hinaus ist es notwendig, Vorwissen, z.B. Grenzwerte über maximale Hangneigung oder die Derbholzgrenze von 7 cm m.R. in Brusthöhe, in die Auswertung einzubeziehen. Spezielle Datenfilter, bei denen z.B. maximale Winkel zwischen benachbarten Punkten oder minimale Höhenwerte berücksichtigt werden, führen zu einer weiteren Verringerung des Datenumfanges. Die endgültige Abgrenzung der einzelnen Objekte erfolgt schließlich sowohl mit Methoden der klassischen Bildanalyse (nach Rasterung der Bilder z.B. HOUGH-Transformation oder Region Growing) als auch mit 3-D-Algorithmen auf Grundlage der 3-D-Koordinaten (z.B. Power Crust-Algorithmus).

Das Ergebnis dieser Berechnungen sind einerseits Kennzahlen zur numerischen Charakterisierung von Waldbeständen, wie z.B. Baumfußkoordinaten, Bhd oder Kronenansatzhöhe als auch 3-D-Modelle, die eine Visualisierung des Aufnahmepunktes ermöglichen und gleichzeitig für weitergehende Fragestellungen genutzt werden können.

Vorzüge und Schwierigkeiten des Verfahrens

Aufgrund der Neuartigkeit dieses Vermessungsverfahrens im forstlichen Bereich sind Vergleiche mit herkömmlichen Vermessungsmethoden (z.B. Theodolit bei der Einmessung von Baumfußpunkten im

Tab. 1: Stärken und Schwächen der terrestrischen Laservermessung für forstliche Anwendungen

Kriterium	Scan-Modus	
	Single-Scan	Multiple-Scan
Zeitbedarf	++	--
Genauigkeit	+	+++
Einsatzfähigkeit in der forstlichen Praxis	-	--
Informationsgehalt	++	+++
+++ sehr gute Bewertung, --- sehr schlechte Bewertung		

forstlichen Versuchswesen) nur teilweise möglich. Die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens werden daher auf der Grundlage der am Institut für Waldwachstum gemachten Erfahrungen zusammengestellt (s. Tab. 1).

Hinsichtlich des Zeitbedarfs beim eigentlichen Vermessungsvorgang im Wald unterscheiden sich die beiden oben beschriebenen Modi erheblich. Während ein einzelner Scan (Single-Scan-Modus) inklusive Rüstzeit 10 bis 15 Minuten in Anspruch nimmt, ist, bedingt durch die zusätzliche Einmessung verschiedener Scannerstandpunkte und der erforderlichen Passpunkte, der Multiple-Scan-Modus erheblich aufwändiger, und der Vermessungsvorgang kann sich durchaus in Abhängigkeit von der Geländebeschaffenheit auf bis zu zwei Stunden erstrecken.

Sofern die Auswertungsalgorithmen vorhanden sind, erfolgt die Berechnung der interessierenden Parameter automatisiert. Dieser Arbeitsvorgang erfolgt entkoppelt vom Vermessungsvorgang und kann im Büro durchgeführt werden. Der Zeitbedarf hängt von der Rechnerleistung und von den interessierenden Ergebnissen ab und beträgt durchschnittlich 5 bis 10 Minuten je Stichprobenpunkt. Die Genauigkeit des Verfahrens ist beim Single-Scan-Modus geringer als beim Multiple-Scan-Modus.

Der Bhd z.B. kann im Vergleich zur konventionellen Vermessung mit der Kluppe im Mittel auf ca. 1 cm genau ermittelt werden, wie erste Auswertungen ergaben. Ein großer Vorteil ist, dass mit gleicher Genauigkeit auch Durchmesser in größeren Baumhöhen bestimmt werden können. Die Präzision der Bestimmung der Baumfußpunkte entspricht den Ergebnissen von Theodolit-Messung und ist daher erheblich genauer als die Bestimmung von Lagekoordinaten mit Bussole und Bandmaß.

Praktische Gründe sprechen gegenwärtig noch gegen einen standardisierten Einsatz des Verfahrens in der forstlichen Praxis. Vor allem das hohe Gewicht (13 kg ohne Stativ), der eingeschränkte Temperatureinsatzbereich und die Notwendigkeit, zusätzliche Geräte (z.B. Tachymeter für den Multiple-Scan-Modus) in Anspruch nehmen zu müssen, sprechen gegen einen Praxiseinsatz zum gegenwärtigen Zeitpunkt. Für wissenschaftliche Untersuchungen stellt sich die Situation differenzierter dar. Die technische Weiterentwicklung in den nächsten Jahren lässt aber erhebliche Verbesserungen im Bereich der Gewichtsreduktion und in einer Vereinfachung der Möglichkeit, mehrere Scans zueinander zu orientieren, erwarten.

Einschränkend muss darüber hinaus festgehalten werden, dass im Unterschied zu Industrieanlagen oder Baudenkmalern im Wald keine standardisierten Bedingun-

gen herrschen. Verdeckungen, Windbewegungen oder bei der Einbeziehung von Farbaufnahmen auch unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse können dazu führen, dass Objekte nicht befriedigend klassifiziert werden.

Um dreidimensionale Objekte vermessen zu können, ist zudem eine bestimmte Anzahl von Mindestpunkten erforderlich, daher sind z.B. Äste oder andere Objekte mit einem Durchmesser von unter 2 cm nicht mehr zu erfassen.

Hauptmotivation für die Prüfung der Einsatzmöglichkeiten terrestrischer Laserscanner ist die Vermessung von Kenngrößen, die auf herkömmliche Weise nur angenähert gemessen oder gar nur geschätzt werden konnten. Hierzu zählen insbesondere Parameter, die die äußerlich erkennbare Holzqualität beschreiben (z.B. Krümmung, Abholzigkeit, Ovalität oder Astnarben an stehenden Bäumen). Darüber hinaus können neue Informationen, wie z.B. die Ermittlung der oberirdischen Biomasse durch die Vermessung der Verzweigungsstruktur genauer erfasst werden und z.B. verschiedenen vertikalen Schichten zugeordnet werden. Diese Parameter sind vor allem aus echten 3-D-Modellen ableitbar (d.h. im Multiple-Scan-Modus), daher ist der Informationsgehalt hier höher einzustufen.

Für beide Verfahren gilt, dass ein bestehender Waldzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt sehr genau beschrieben wird, wodurch auch Auswertungen, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht absehbar waren, auf der Grundlage vorhandenen Rohdatenmaterials in Zukunft nachgeholt werden können und zusätzlich die Veränderungsdynamik im zeitlichen Kontext bei wiederholten Aufnahmen erfasst werden kann. Dies gilt umso mehr, als einer der wesentlichsten Vorteile des Messverfahrens die Objektivität ist [7], d.h. da insbesondere das Auswertungsverfahren weitgehend automatisiert ist, werden bei Aufnahmen vom gleichen Standpunkt identische Ergebnisse erzielt, unabhängig von der Messperson, etwaigen Gerätefehlern oder sonstigen subjektiven Einflüssen.

Anwendungsmöglichkeiten in Praxis und Wissenschaft

Im Rahmen forstlicher Inventuren ist die vorgestellte Laserscanner-Vermessung vor allem wegen der Objektivität der Datenerhebung ein interessantes Verfahren. Insbesondere bei Wiederholungsinventuren kann auf diese Weise ein Standard erhalten werden, der dazu beiträgt, Fehler zu verringern und die Vergleichbarkeit zwischen Folgeinventuren zu erhöhen. Zusätzlich können Kennwerte zur Beschreibung der Holzqualität in die Inventurkonzeption einbezogen werden, auf

diese Weise kann einer Produktdiversifizierung des Rohstoffs Holz in erheblich besserem Maße Rechnung getragen werden.

Die Berechnung von Baumschäften und Baumkronen als dreidimensionale geometrische Körper ermöglicht darüber hinaus eine genauere Bestimmung von Inventurgrößen, die in der forstpolitischen Diskussion von wachsender Bedeutung sind, wie z.B. die Biomasse eines Waldbestandes oder eine Abschätzung des CO₂-Speichervermögens.

Im wissenschaftlichen Bereich ist auf diese Weise u.U. auch eine bessere Evaluierung ökophysiologischer Prozessmodelle denkbar. Gleichzeitig können diese Ergebnisse für Habitatuntersuchungen von Lebewesen mit geringen Aktionsradien genutzt werden (z.B. Orientierung von Fledermäusen in Wäldern, Besiedlungsstrategien von forstschutzrelevanten Insekten in verschiedenen Bestandeschichten).

Die Visualisierung von realen Waldbeständen kann sowohl für waldbauliche Schulungen als auch z.B. für die Ausbildung in der Bedienung forstlicher Großgeräte wie z.B. Harvester genutzt werden.

Insbesondere in Verbindung mit Waldwachstumssimulatoren können Konsequenzen heute getroffener Entscheidungen in die Zukunft übertragen werden [8]. Letztlich können im Rahmen der Landschaftsplanung verschiedene Handlungsalternativen geprüft werden und somit eine Entscheidungshilfe gegeben werden [9].

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass sich der Einsatz terrestrischer Laserscanner für Forst- und Landschaftsinventuren in der fortgeschrittenen Entwicklungsphase befindet und durch die neue Vermessungstechnologie ein viel versprechender Informationszugewinn ermöglicht wird, der erwarten lässt, dass für viele forstpraktische und -wissenschaftliche Fragestellungen Laserscanner an Bedeutung erheblich gewinnen werden.

Literaturhinweise:

- [1] THIES, M.; KOCH, B.; SPIECKER, H. (2002): Einsatzmöglichkeiten von Laserscannern für Wald- und Landschaftsinventuren. AFZ-DerWald 59;(8): 395- 397.
- [2] METTENLEITER, M.; FRÖHLICH, C. (2000): Visuelles Laserradar zur 3D-Erfassung und Modellierung realer Umgebungen. Oldenbourg Verlag, at/ 4: 182- 190.
- [3] LEMMERS, M. J.P.M.; HEUVEL VAN DEN, F.A. (2001): 3D Close-range Laser Mapping Systems. GIM international Feature: 30- 33.
- [4] ZOLLER & FRÖHLICH: Technische Daten IMAGER 5003. www.zf-laser.com. Stand: 16.08.2003.
- [5] HEINZ, I.; HÄRTL, F.; FRÖHLICH, C. (2001): Semi-Automatic 3D CAD Model Generation of As-Built Conditions of Real Environments using a Visual Laser Radar. Proc. 10th. IEEE International Workshop on Robot-Human Interactive Communication (ROMAN01), Paris, France, 18.-21.9.2001.
- [6] FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG (1995): Betriebsinventur auf Stichprobenbasis (B) Baden-Württemberg. Verfahrensbeschreibung und Aufnahmeanweisung. 20 S.
- [7] OPTECH INCORPORATED (2003): Forest Application: Plot-level Forest Mensuration. Field Notes. 2 S.
- [8] PRETZSCH H.; SEIFERT, S. (1999): Wissenschaftliche Visualisierung des Waldwachstums. AFZ-Der Wald 54; (18): 960- 962.
- [9] SHEPPARD, S. R. J. (2000): Visualization as a Decision-Support Tool in Managing Forest Ecosystems. Decision Support Systems 16;(1): 25- 40.