

# Einsatz der Mehrbildtriangulation zur strukturellen Analyse von Baumpflanzen

Alexander Riedel

Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung, Technische Universität München, Am Hochanger 13, D-85354 Freising

**Kurzfassung:** Für Messaufgaben im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 607 der DFG wird ein Verfahren benötigt, um verschiedene räumliche Strukturdaten von Buchen- und Fichtenpflanzen dreidimensional und zerstörungsfrei zu erfassen. Als eine geeignete photogrammetrische Verfahrensweise wurde bereits der Silhouettenschnitt vorgestellt. Diese umfassende Messmethode hat allerdings den Nachteil, dass sie für die Bearbeitung der anfallenden Datenmengen sehr leistungsfähige Computer benötigt.

Mit der Mehrbildtriangulation wird ein weiteres Verfahren vorgestellt, welches auf handelsüblicher Hardware basierend eine automatisierte Erfassung von räumlichen Baumdaten ermöglicht. Durch das Zusammenwirken von gängiger Photogrammetrie-Software mit speziell angefertigten Programmen zur strukturellen Analyse der Baumpflanzen können neben einfachen räumlichen Koordinatenangaben auch Werte wie Trieb- und Segmentlängen, Durchmesserangaben, Anzahl der Knospen, Anzahl von Seitenästen, Verzweigungswinkel, Kronenprojektionsflächen usw. automatisiert berechnet werden. Über Regressionen besteht weiterhin die Möglichkeit, auch Aussagen zur Zweig- und Astbiomasse zu treffen.

## Structural Analysis of Tree Plants by Means of Photogrammetric Triangulation

**Abstract:** For measurement tasks within the „Sonderforschungsbereich 607“ (special research field 607) a method is required to obtain different structural parameters of beech and spruce plants three-dimensionally and non-destructively. Silhouette cut has already been presented as a suitable photogrammetric approach to this problem. However, this comprehensive procedure has the disadvantage that it requires high-performance computing equipment due to the vast amount of data which has to be processed.

Therefore, multi-picture triangulation is presented as a further procedure, making it possible to collect spatial data of tree plants with commonly available equipment. By combining commercially available photogrammetric software and specially developed programs for the structural analysis of tree plants not only three-dimensional coordinates can be obtained automatically, but also values like shoot and segment lengths, diameters, number of buds, number of branches, branching angles, crown projection areas. Furthermore you can also make statements on the biomass of stem and branches by means of regression.

**Key words:** 3D-measurement, plant structure, multi-picture triangulation, photogrammetry

## 1 Zielsetzung

Der seit Juli 2001 in der zweiten Förderungsphase befindliche Sonderforschungsbereich 607 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) („Wachstum und Parasitenabwehr“, Sprecheruniversität TU München) befasst sich mit dem Wettbewerb um Ressourcen bei Nutzpflanzen in den anthropogen geprägten ökologischen Systemen der Land- und Forstwirtschaft. Insbesondere soll ermittelt werden, wie Pflanzen in Stresssituationen die interne Ressourcenallokation im Spannungsfeld Parasitenabwehr und Pflanzenwachstum handhaben (SFB 607 im Internet: [1]).

Für verschiedene Untersuchungen im Rahmen der einzelnen Teilprojekte dieses Forschungsverbundes werden Verfahren zur zerstörungsfreien Analyse und Bestimmung der Raumbesetzung durch die Dendromasse benötigt. Zielsetzung des hierfür am Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung zu entwickelnden Verfahrens (Teilprojekt B3 des SFB, siehe [2]) soll es sein, Methoden zur räumlichen Vermessung von Baumpflanzen (Buche und Fichte) zu entwickeln. Es soll ermöglicht werden, diese Pflanzen zerstörungsfrei dreidimensional zu vermessen und über einen längeren Entwicklungszeitraum hinweg beobachten zu können. Zum angestrebten Datenmaterial zählen unter anderem Angaben zur Verzweigungsstruktur, zur Länge und Anzahl von Trieben und gegebenenfalls Wurzeln sowie zur räumlichen Verteilung von Masse und Volumen der verschiedenen Biomassefraktionen.

Im Rahmen des Teilprojektes B3 werden dazu Messmethoden aus verschiedenen Branchen auf ihre Tauglichkeit zur Vermessung von Baumpflanzen geprüft. Ein vielversprechender Ansatz wurde in Form des so genannten Silhouettenschnitts vorgestellt (Riedel 2000). Dieses photogrammetrische Verfahren ermöglicht das schnelle, genaue und weitge-

hend automatisierte Erfassen räumlicher Objekte als vollständige Volumenkörper. Nach entsprechender Anpassung von Software und Messverfahren können mit dieser Methode auch 3D-Volumenmodelle von getopften Baumpflanzen eingelesen und mittels handelsüblicher CAD-Software weitergehend vermessen werden. Allerdings zeigte es sich, dass gängige Computersysteme bei der Erfassung der komplexen Objekte von den dabei anfallenden Datenmengen oftmals überfordert sind.

Aufgrund dieser Limitationen wurde im Zuge der weiteren Untersuchungen das Ziel verfolgt, ein mit derzeit verfügbarer, handelsüblicher Standardausstattung durchführbares Verfahren zu entwickeln. In Form der Mehrbildtriangulation steht bereits ein seit langem grundsätzlich erprobtes photogrammetrisches Verfahren zur Verfügung, welches in verschiedenen Abwandlungen bereits im forstlichen Bereich Anwendung gefunden hat (Kronenvermessung bei Hendrich 1997; Messungen des Schaftes an stehenden Bäumen bei Hengl et al. 1997). Im Gegensatz zu der ebenfalls bereits für forstliche Messzwecke eingesetzten Stereophotogrammetrie (Pratsch 1991; Reidelsturz 1997) sind für diese Variante der Fotoauswertung keine teuren Spezialgeräte erforderlich. Der Einsatz preisgünstiger Standard-Software in Verbindung mit handelsüblicher Fototechnik ist ausreichend. Im Folgenden soll beschrieben werden, wie sich auf Grundlage der photogrammetrischen Triangulation eine automatisierte strukturelle Vermessung von Baumpflanzen durchführen lässt.

## 2 Methodik der Mehrbildtriangulation

Die Mehrbildtriangulation kommt bislang vorwiegend in Architektur, Maschinen- und Anlagenbau sowie großräumiger in der Fernerkundung zum Einsatz. Die theoretischen Grund-

lagen sollen an dieser Stelle nur kurz dargestellt werden, da Details zu mathematischen und physikalischen Hintergründen in photogrammetrischen Lehrbüchern wie zum Beispiel bei Kraus (1996 und 1997) ausführlich nachzulesen sind.

Für die photogrammetrische Triangulation werden von dem zu vermessenden Objekt mehrere Bilder aus unterschiedlichen Aufnahmewinkeln gemacht. Anschließend müssen einander entsprechende Objektpunkte auf mindestens zwei der Bilder identifiziert und miteinander referenziert werden. Für die weitere Berechnung ist es notwendig, dass die Kamerakennwerte, also die Parameter der *inneren* und *äußeren Orientierung*, für die einzelnen Fotos bekannt sind. Anhand dieser Daten kann mittels Triangulation die Lage der einzelnen Punkte im Raum errechnet werden. Die Präzision der Koordinatenberechnung ist dabei umso höher, je näher der Winkel zwischen den einzelnen Aufnahmepositionen an 90° liegt. Weiterhin hängt die Genauigkeit davon ab, auf wie vielen Bildern der zu vermessende Punkt korrekt zugeordnet werden kann.

Im praktischen Einsatz ist es ungünstig, dass für die Triangulation die einzelnen Kamerapositionen bekannt sein müssen. Diese Einschränkung macht zeitraubende Einmessarbeiten erforderlich, was schon unter Laborbedingungen aufwändig, unter Feldbedingungen allerdings fast unmöglich ist. Es bietet sich deswegen an, das so genannte „inverse-camera“-Verfahren anzuwenden (EOS Systems 2000), welches auch beim Volumenschnitt zum Einsatz kam (Riedel 2000). Dazu muss die räumliche Lage einiger Punkte, der so genannten Kontrollpunkte, auf den einzelnen Aufnahmen bekannt sein (diese Kontrollpunkte entsprechen funktional dem beim Volumenschnitt verwendeten Kalibriermuster). Anhand dieser Daten können Kameraposition und -ausrichtung (*äußere Orientierung*) problemlos zurückgerechnet werden. Das Verfahren bietet zudem den Vorteil, dass keine kalibrierte Messkamera nötig ist. Vielmehr können charakteristische und teilweise zwischen den einzelnen Aufnahmen variierende Kamerakennwerte der *inneren Orientierung* wie Fokusslänge („focal length“), Bildhauptpunkt („principal point“) und Bildformat („format aspect“) mit hinreichender Genauigkeit nachträglich errechnet werden. Zudem können auf diese Weise problemlos unterschiedliche Zoom-Einstellungen beziehungsweise unterschiedliche Bildformate (Hoch- oder Querformat) für einzelne Aufnahmen eingesetzt werden. „Inverse camera“ wirkt sich zudem positiv bezüglich der erreichbaren Genauigkeit aus, insbesondere wenn, wie im vorliegenden Projekt, keine teuren, speziell geeichten Messkameras, sondern handelsübliche Modelle (hier: Kodak DC 265, [3]) zum Einsatz kommen sollen.

Zur photogrammetrischen Triangulation von Baumpflanzen wird im Rahmen des beschriebenen Forschungsprojektes auf das Programm „Photomodeler Pro“ der Firma EOS Systems ([4]), derzeit in der Version 4.0f, zurückgegriffen. Dieses Programm bietet, über den normalen Funktionsumfang derartiger Photogrammetrie-Software hinaus, die Möglichkeit, nicht nur einzelne Objektpunkte im Raum zu vermessen, sondern auch komplexere geometrische Formen. Dazu zählen zum Beispiel neben einfachen Geraden auch so genannte NURBS („non-uniform rational b-splines“), also unregelmäßige geformte Linien, deren Verlauf in der Computergrafik durch eine Reihung spezieller Kurvenfunktionen angenähert wird. Diese eignen sich daher gut zur näherungsweise Erfassung unregelmäßig geformter Objektbestandteile. Oberflächen und zylinderförmige Objekte können ebenfalls direkt vermessen werden. Dazu bietet das Programm Funktionen zur

Automatisierung bestimmter Messabläufe (zum Beispiel automatisches Referenzieren) und Hilfsroutinen für schwer einsehbare Objektbereiche. Gerade Letzteres ist bei den komplexen und teils unübersichtlichen Formen, die selbst bei jungen Bäumen die Erfassung erschweren, sehr hilfreich. Hier erweisen sich die so genannten Epipolarlinien als nützlich: Dabei handelt es sich um vom Computer berechnete Hilfslinien, welche in das 2D-Foto eingeblendet werden und, basierend auf den bislang vorliegenden Referenzdaten, die ungefähre Lage eines gesuchten Objektpunktes auf diesem Bild andeuten.

Um das „inverse-camera“-Verfahren sinnvoll einsetzen zu können, wird ein tragbares würfelförmiges Gestell über die Pflanze gestellt. Dessen farblich markierte Eckpunkte dienen als bekannte Kontrollpunkte und können deswegen zur äußeren (als Bezugspunkte für das lokale Koordinatensystem) und inneren Orientierung der Kamera herangezogen werden. Natürlich könnten diese signalisierten Punkte beliebig angeordnet werden, aber in dieser Konstellation umschließen sie gleichmäßig den Raum um das zu vermessende Objekt, was die Messpräzision im „inverse-camera“-Verfahren erhöht.

Weiterhin von Bedeutung ist ein gleichmäßiger, mit dem Messobjekt kontrastierender Hintergrund zur Arbeitserleichterung. Als besonders wirksam haben sich speziell beschichtete Dia-Leinwände erwiesen (leichte Reflexion bei Blitzlicht), aber auch weiße Laken erfüllen zufrieden stellend diesen Zweck. In Abbildung 1 ist die beschriebene Aufnahmeanordnung anhand eines in Bearbeitung befindlichen Projektes dargestellt.

Die Aufnahmen werden in 45°-Winkeln rund um das Messobjekt gemacht, also 8 Stück pro Messobjekt. Dabei ist es unerheblich, ob die Kamerapositionen wechseln und das Objekt stationär bleibt, wie bei Feldaufnahmen unumgänglich, oder ob umgekehrt aus einer Kameraposition Aufnahmen der Kombination Pflanze/Kontrollgestell aus unterschiedlichen Drehwinkeln gemacht werden. Auf diese Weise sind auf jedem Foto mindestens 4, meistens sogar 6 Kontrollpunkte erkennbar. Für den eigentlichen Messvorgang werden allerdings nur so viele Aufnahmen verwendet, wie nötig sind, um alle relevanten Pflanzenbestandteile auf mindestens zwei Bildern einsehen zu können. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei sorgfältiger Wahl geeigneter Aufnahmepositionen meist 4 bis maximal 5 Fotos ausreichen.

Nach dem Markieren und Referenzieren der Kontrollpunkte, was durch deren farbliche Kennzeichnung auf 2 mm genau erfolgen kann, werden sämtliche Verzweigungs- und Endpunkte (Triebspitzen) der Baumpflanze photogrammetrisch eingemessen. Da es rein um die Gewinnung von Strukturdaten geht, wird im beschriebenen Fall die Vermessung der Buchen im unbelaubten Winterzustand vorgenommen. Die einzelnen Astsegmente werden dann als von diesen Punkten begrenzte Geraden markiert. Eine Erhöhung der Genauigkeit wäre durch die Markierung mittels NURBS erreichbar, da hiermit unregelmäßigere Verläufe genauer erfasst werden können. Allerdings erfordern diese B-Splines im Gegensatz zu einfachen Linien einen höheren Messaufwand: Während die Geraden bereits durch ihren Anfangs- und Endpunkt eindeutig im Raum definiert sind und keine weitere Bearbeitung benötigen, muss der unregelmäßige Verlauf von B-Splines auf mindestens zwei (für eine verwertbare Genauigkeit allerdings meist mehr) Bildern markiert und referenziert werden. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde deswegen auf diese Option nur zu Vergleichszwecken zurückgegriffen.

Ist zusätzlich noch die Erhebung von Durchmesserdaten erwünscht, so ist dies problemlos durch die Verwendung von

Zylinderobjekten möglich. Das zu vermessende Segment wird dazu nicht als Linie oder NURBS, sondern als Zylinder markiert und referenziert. Der Mittendurchmesser kann dann leicht abgegriffen werden. Diese Vorgehensweise wird im vorliegenden Projekt hauptsächlich für die Messung des Sprossbasisdurchmessers herangezogen, welcher, analog zu den Untersuchungen von Ammer (2000) zur Bestimmung der Biomasse junger Buchenpflanzen, in 3 cm Höhe abgegriffen wird.

Erfolgt die Erfassung der Pflanze vollständig und detailliert bis hin zu jeder einzelnen Knospe, wie oben beschrieben, ist die Gewinnung dieses umfassenden Datenmaterials mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden. Nach den bisher gewonnenen Erfahrungen mit 30–100 cm hohen Baumpflanzen sind dafür eine bis knapp vier Stunden anzusetzen. Dabei ist eine sorgfältige Vorgehensweise angebracht, da einmal falsch referenzierte Punkte alle folgenden Berechnungsvorgänge empfindlich stören und eine aufwändige Fehlersuche nach sich ziehen. Das beschriebene Verfahren kann allerdings, je nach den Ansprüchen an das zu gewinnende Datenmaterial, deutlich vereinfacht werden: Beschränkt man sich zum Beispiel lediglich auf die Erfassung des Haupttriebes und der leicht erkennbaren Seitenäste 1. Ordnung, so können diese Daten meist innerhalb weniger Minuten, gegebenenfalls auch mittels NURBS, genau gemessen werden. Es ist gerade die Erfassung der Details, welche den Zeitaufwand in die Höhe treibt. Im Folgenden soll weiterhin der umfassende Fall der kompletten Vermessung behandelt werden.

### 3 Weiterverarbeitung der Messdaten

#### 3.1 Datenmodell für die Strukturdaten

Als Resultat der vorangehend dargestellten Arbeiten erhält man ein räumliches Modell des Baumes, welches sowohl direkt im Photogrammetrieprogramm als auch exportiert in handelsüblicher CAD-Software vermessen werden kann. In diesem Fall können die vorhandenen Messfunktionen allerdings nur sehr umständlich für eine Erfassung von Pflanzen eingesetzt werden. Daher wurden die nötigen Routinen für die Analyse der photogrammetrischen Rohdaten in der Programmiersprache C neu entwickelt und zu einer eigenständigen, erweiterbaren Auswerte-Software für die photogrammetrischen Rohdaten zusammengefasst. So wird auch eine weitere Automatisierung der Datengewinnung ermöglicht.

Grundvoraussetzung für die automatisierte Strukturanalyse ist es, die vorliegenden 3D-Daten in ein für die Weiterverarbeitung sinnvolles Format zu bringen. Für den Computer stellen die vorliegenden Werte nach der photogrammetrischen Aufnahme nur eine Ansammlung von Geraden (bzw. Kurven) und Punkten im dreidimensionalen Raum dar. Angaben über die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Zweigabschnitten beziehungsweise deren hierarchische Struktur, die sich für den menschlichen Betrachter problemlos ergeben, fehlen dem Computer. Gerade diese Werte sind aber für eine strukturelle Analyse unbedingt notwendig. Die Rohdaten müssen daher vor der automatisierten Weiterverarbeitung in ein geeignetes Architekturmodell eingepasst werden.

Insbesondere für funktional-strukturelle Baummodelle wurde bereits eine Reihe derartiger Modelle vorgeschlagen (siehe auch entsprechende Beiträge in *Finish Society Of Forest Science* 1997 und *INRA* 1998). Im Rahmen des „Virtual Plants“-Projektes wurde zum Beispiel – hier allerdings zur Simulation des Pflanzenwachses – eine an L-Systeme angepasste Syntax zur Beschreibung des Entwicklungsganges ange-

wandt (Room et al. 1994). Von besonderem Interesse ist weiterhin ein von der INRA entwickeltes Modell (Godin et al. 1999), welches bereits bei dreidimensional vermessenen Bäumen (Sinoquet und Rivet 1997) zur Datenanalyse eingesetzt wurde. Der Baum wird hierbei in einzelne Wachstumseinheiten (Stamm-, Ast- und Zweigabschnitte zwischen den Verzweigungspunkten, Knospen, Blüten, Blätter) als kleinste Strukturelemente gegliedert. Im Rahmen dieses Modells wurde auch die Differenzierung des Datenmaterials in *geometrische* und *topologische* Informationen eingeführt: Unter *Geometrie* versteht man Form, Größe und räumliche Positionsdaten der einzelnen Wachstumseinheiten, während die *Topologie* deren physikalische Verbindung untereinander beinhaltet.

Diese Methoden zur Strukturbeschreibung von Pflanzen erweisen sich als sehr umfassend, sind allerdings auch sehr komplex und relativ schwierig in der praktischen Handhabung. Im vorliegenden Projekt wurde deswegen auf eine einfacher lesbare und für die Weiterverarbeitung leichter handhabbare Syntax zur Charakterisierung der Architektur Wert gelegt, insbesondere auch im Hinblick auf die problemlose Implementierung in Software-Algorithmen. Dazu bietet sich eine für die EDV typische Datenstruktur – passenderweise auch hier „Baumstruktur“ genannt – an (Aho u. Ullmann 1996, S. 295ff). Als „Baumstruktur“ wird im Software-Engineering eine hierarchische Datenorganisationsweise mit den folgenden Charakteristika bezeichnet: Es gibt ein Ursprungselement (Datensatz), von dem alle anderen Elemente in einer verästelten Baumstruktur abhängen. Die einzelnen Datenelemente stehen somit in einem so genannten „parent/child“-Verhältnis. Das heißt, bis auf das Ursprungselement haben alle Elemente genau einen Vorgänger („parent“), und alle Segmente können keinen bis beliebig viele Nachfolger („children“) haben.

Da diese Art der Datenorganisation in der EDV vom Bild eines Baumes mit Ästen und Verzweigungen entlehnt ist, lassen sich umgekehrt auch die Daten eines Baumes derartig speichern, wie dies in Abbildung 3 dargestellt ist. Die Ast- und Zweigabschnitte einer Pflanze werden dazu in Hierarchieebenen eingeteilt. Die Segmente des Leittriebes gehören zum Beispiel zur ersten Hierarchieebene (H1), die davon abzweigenden Seitenäste zur zweiten Hierarchieebene (H2) usw. Innerhalb jeder Hierarchieebene werden die einzelnen Zweigabschnitte von der Sprossbasis beziehungsweise vom jeweiligen Verzweigungspunkt aus durchnummeriert. Um auch bei mehreren gleichwertigen Seitentrieben eine eindeutige Unterscheidung zu ermöglichen, werden in solchen Fällen Subindizes eingeführt. In Abbildung 3 ist dies beispielhaft anhand der untersten Verzweigung dargestellt: Die beiden Seitenäste „1-1(1)-0“ und „1-1(2)-0“ sind gleichermaßen Nachfolgesegmente des ersten Segments der Hauptachse („1-0-0“) und werden deswegen mit den Ordnungsziffern „(1)“ und „(2)“ unterschieden. Mit diesem Datenmodell lässt sich jedes Baumsegment eindeutig als Datensatz anhand von wenigen Kennzahlen identifizieren. Ein Segmentdatensatz enthält somit sowohl die topologischen (Position in der Baumhierarchie) als auch die geometrischen Daten (räumliche Koordinaten).

#### 3.2 Errechenbare Parameter

Die aus den photogrammetrisch erhobenen Daten gewonnenen Informationen beziehen sich zum einen auf das jeweilige Einzelsegment, aber auch, darauf aufbauend, auf die gesamte Baumpflanze. Beispielsweise werden in der gegenwärtigen Fassung der Auswertesoftware die folgenden Parameter zur Verfügung gestellt:

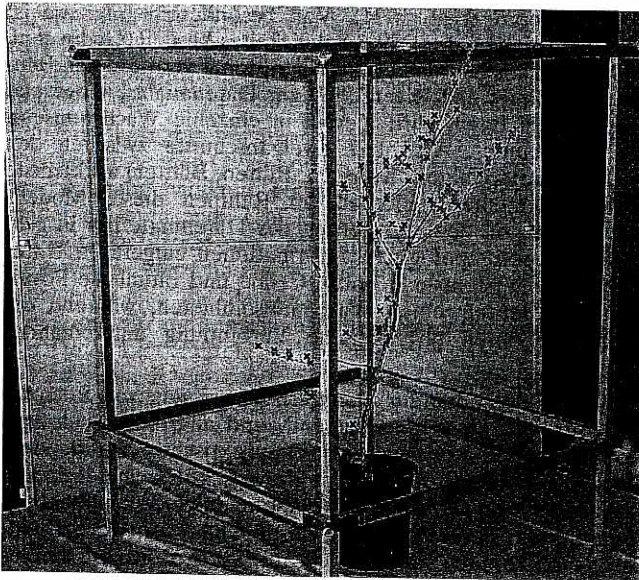
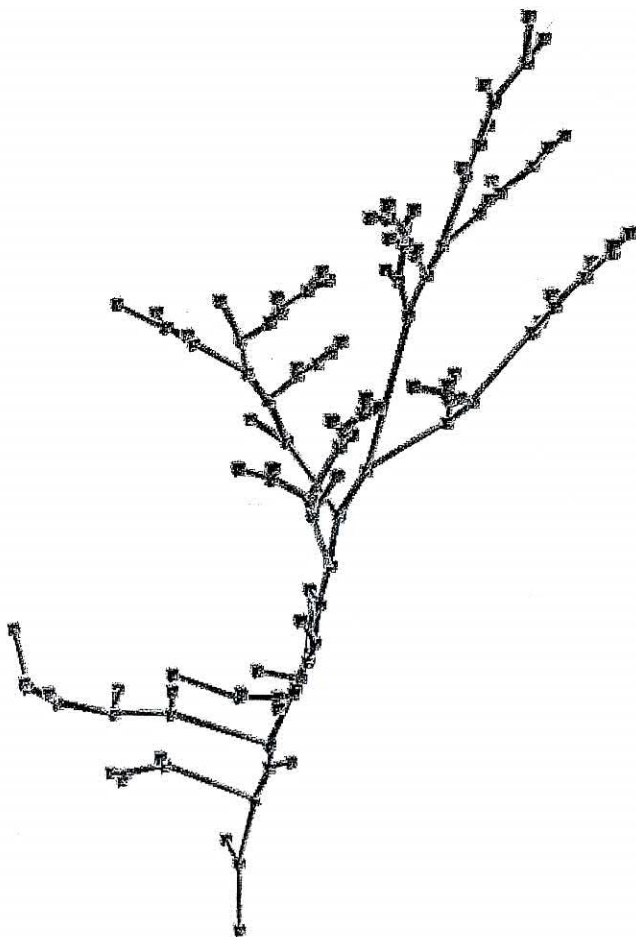


Abb. 1. Vermessung einer Buchenpflanze mit der Software „Photomodeller Pro“. Die aus dieser Position einsehbaren Kontrollpunkte (Eckpunkte des Gestells) sind vom Programm durch Dreiecke, normale Messpunkte durch Kreuze gekennzeichnet worden.  
Measurement of a beech plant by means of the software „Photomodeller Pro“. The program has marked visible control points (corners of the framework) with triangles and normally measured points with crosses.

- Räumliche Lage (Anfangs- und Endpunkt);
- Segmentlänge (berechnet als direkte räumliche Entfernung zwischen den beiden Endpunkten);
- Hierarchische Klassifizierung (zum Beispiel ist Segment 2-1-1 aus Abbildung 3 aus der Hierarchieebene 3);
- Art des Segments („Knospe“ oder „Zweig“, wobei davon ausgegangen wird, dass jedes Segment ohne Nachfolger als Knospe anzusehen ist);
- Vorhergehendes („parent“) Segment;
- Baumhöhe des gemessenen Segmentes (Entfernung von der Sprossbasis, also Summe der Längen der Vorgängersegmente);
- Zweigabgangswinkel (Winkel zum Vorgängersegment);
- Weiterhin können zu Vergleichszwecken die Ergebnisse einer eventuellen händischen Messung der obigen Parameter (beziehungsweise zusätzlich konventionell erhobene Trockenmassedaten) als Referenz mit in die Bearbeitung einbezogen werden;
- Mit diesen Informationen können weitergehend auch Daten für den gesamten Baum berechnet werden:
- Baumhöhe (Entfernung des höchsten gemessenen Punktes von der Bodenoberfläche, wobei diese als horizontale Ebene durch den Sprossbasispunkt definiert ist);
- Länge des Haupttriebes beziehungsweise ausgewählter Seitentriebe;
- Anzahl der Seitentriebe einer bestimmten Ordnung;
- Anzahl der Knospen;
- Durchschnittlicher Abgangswinkel der Seitenäste von der Sprossachse.



Tab. 1. Berechnete Daten zur Baumpflanze. Nicht erhobene beziehungsweise nicht berechenbare Werte sind als „na“ (not available) gekennzeichnet.  
Calculated data for the tree plant. Values not measured or not calculable are marked as „na“ (not available).

	Photogrammetrische Messung	Manuelle Messung
Baum ID	05	05
Sprossbasisdurchmesser	8,32 mm	8,0 mm
Punkte (inkl. Kontrollpunkte)	134	na
Höhe	72,94 cm	na
Knospen	68	66
Segmente	131	135
Segmente H1	21	22
Segmente H2	57	58
Segmente H3	45	46
Segmente H4	8	9
Segmente H5	0	0
Haupttrieb Länge	78,39 cm	79,2 cm
Haupttrieb Segmente	21	22
Haupttrieb Mittensegment ID	78	na
Segmente Sprossachse	21	22
Mittlerer Abgangswinkel H1	144,08°	na

◀Abb. 2. Fertig eingemessenes räumliches Modell der Buchenpflanze aus Abbildung 1.  
Completely measured spatial model of the beech plant from figure 1.

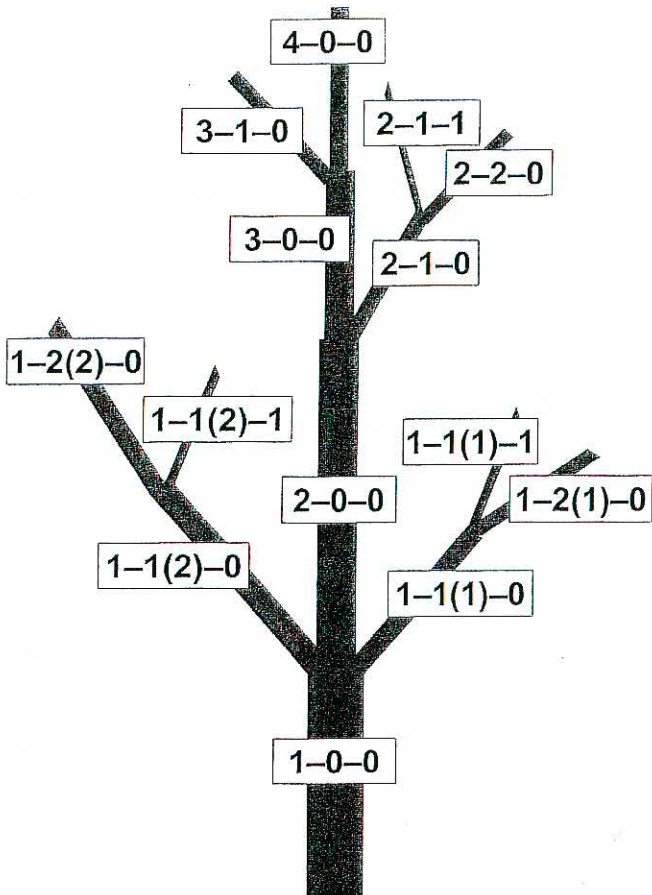


Abb. 3. Schematische Darstellung der für die Baumarchitektur verwendeten Syntax. Am Beispiel der ersten Verzweigung wird die Verwendung von Subindizes dargestellt.  
Schematic presentation of the syntax employed for the tree architecture. The lowest branching gives an example of the use of subindices.

Natürlich können weitere Daten anhand dieser Parameter nach Bedarf errechnet werden. In Tabelle 1 sind, beispielhaft für die Buchenpflanze aus den Abbildungen 1 und 2, die Resultate einer Auswertung dargestellt, wobei zusätzlich die Ergebnisse einer händischen Vergleichsmessung mit einbezogen wurden. Es ist erkennbar, dass nur geringfügige Unterschiede zwischen photogrammetrischer Messung und händischer Vergleichsmessung auftreten: Kleinere Details, insbesondere anliegende Knospen, können auf den Fotos übersehen werden. Zudem stimmt die Annahme, dass jedes Segment ohne Nachfolger eine Knospe darstellt, nicht in jedem Fall (abgebrochene Äste usw.). Eine zum Vergleich durchgeführte Messung des Haupttriebes mittels NURBS demonstriert die Erhöhung der Genauigkeit durch Einsatz dieser aufwändigeren Methode: Diese Messung ergibt mit 79,4313 cm einen fast mit der händischen Messung übereinstimmenden Wert.

Einen Ausblick auf weitere Auswertemöglichkeiten des Datenmaterials soll Abbildung 4 geben. So ist es ohne Probleme möglich, Daten zur Kronenprojektionsfläche zu gewinnen: Diese wird einfach als eine Punktwolke, definiert als Projektion der räumlichen Messpunkte auf eine durch den Sprossbasispunkt definierte horizontale Ebene, dargestellt. Technisch gesehen, lässt sich diese Projektion der 3D-Daten auf eine 2D-Ebene im gewählten Koordinatensystem durch einfaches

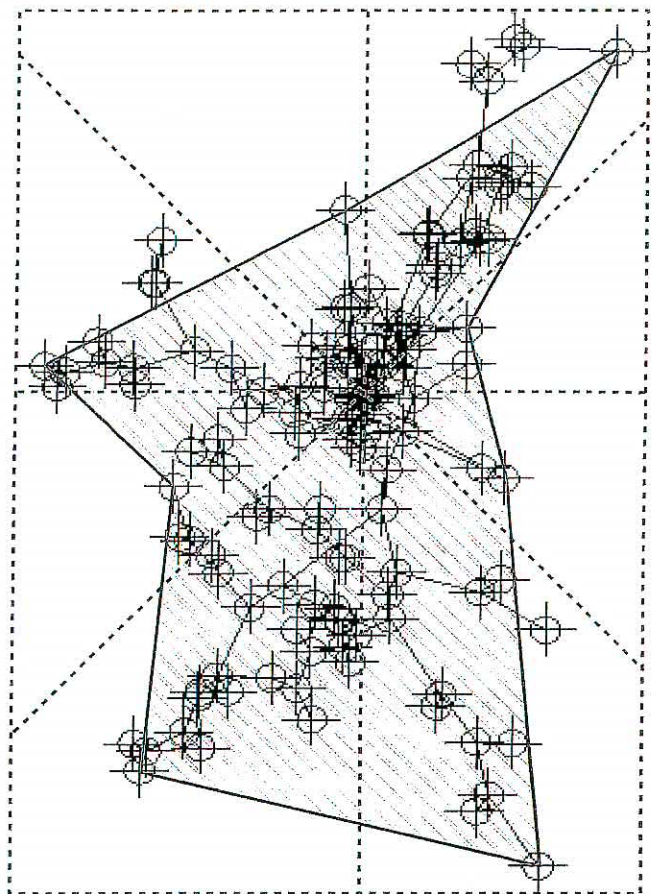


Abb. 4. Darstellung der Kronenprojektionsfläche der Buchenpflanze als Projektion aller gemessenen Koordinaten auf eine horizontale Ebene durch den Sprossfußpunkt.  
Illustration of the crown projection area of the tree plant, as a projection of all measured points onto a horizontal plane through the basal point of the shoot.

Streichen der jeweiligen Z-Koordinaten realisieren, da der Sprossbasispunkt sowohl Ursprung des 2D- als auch des 3D-Koordinatensystems ist. Um aussagekräftige Flächendaten errechnen zu können, wurde im vorliegenden Fall die Projektionsfläche, ausgehend vom Sprossbasispunkt, in 45°-Segmente aufgeteilt. Die in den jeweiligen Segmenten vom Ursprung am entferntesten liegenden Punkte definieren dann in Form eines Polygonzuges die Projektionsfläche. Natürlich können auch andere Einteilungen vorgenommen werden.

Ähnlich wie diese zweidimensionale Auswertung von Kronenparametern soll in einem weiteren Schritt auch die räumliche Ausdehnung der Krone auf diese Art und Weise errechnet werden.

Weiterhin lassen sich auch Angaben zur Trockenbiomasse machen: Dies soll am Beispiel der von Ammer (2000, S. 67ff) verwendeten Beziehung gezeigt werden: Hier wurde zur Schätzung der Biomasse des Leittriebes von Buchenpflanzen (Sprosstrockengewicht, Sptg) aus den Parametern Sprossbasisdurchmesser (bd), Mittendurchmesser (md) und Sprosslänge (l) folgende Beziehung hergeleitet:

$$\text{Sptg} = e^{-0,726276 + 0,934375 \cdot \ln(\text{bd} \cdot \text{md} \cdot l)}$$

Nach dieser Formel ergibt sich unter Verwendung der händisch erhobenen Messwerte (Sprossbasisdurchmesser 8,0 mm, Mittendurchmesser der Sprossachse 5,3 mm, Sprosslänge

79,2 cm) eine Biomasse von 12,8980 g. Aber diese Parameter können natürlich auch photogrammetrisch erhoben werden, als „Mittendurchmesser“ wird dabei der Mittendurchmesser des Segmentes auf halber Höhe des Haupttriebes angenommen. Mit den derart gemessenen Werten (Basisdurchmesser 8,32 mm, Mittendurchmesser 5,09 mm) errechnet sich eine Trockenmasse von 12,7603 g, bei Verwendung des genaueren NURBS-Wertes für die Triebblänge von 12,9186 g. Die mit der Formel angenäherten Haupttriebmassen liegen somit nah an dem real gewogenen Wert für die Trockenmasse (13,7578 g).

Das als Mittendurchmesser des Leittriebs zu vermessende Segment kann erst nach einem ersten Auswertedurchgang bestimmt werden. Für weitere Untersuchungen ist es deswegen angestrebt, eine Regressionsgleichung ohne diese Größe aufzustellen.

#### 4 Angaben zur Genauigkeit

Die Genauigkeit der photogrammetrischen Triangulation wird prinzipiell von zahlreichen Einflussgrößen bestimmt. Dazu zählen Parameter wie die inneren Kennwerte der Kamera, der Winkel zwischen den Aufnahmepositionen, die Genauigkeit bei der Markierung der Objektpunkte sowie die Anzahl der Kontrollpunkte pro Bild. Eine weitere Einschränkung der Messgenauigkeit ist eventuell durch den Einsatz der Digitalkamera gegeben, welche zwar deutlich einfacher zu handhaben ist als ein analoges Modell, aber eine geringere Bildauflösung bietet. Dies beeinträchtigt insbesondere die Genauigkeit der Punktmarkierung. Formeln für die Quantifizierung dieser einzelnen Ungenauigkeitsfaktoren können unter anderem bei Kraus (1996 und 1997) nachgelesen werden.

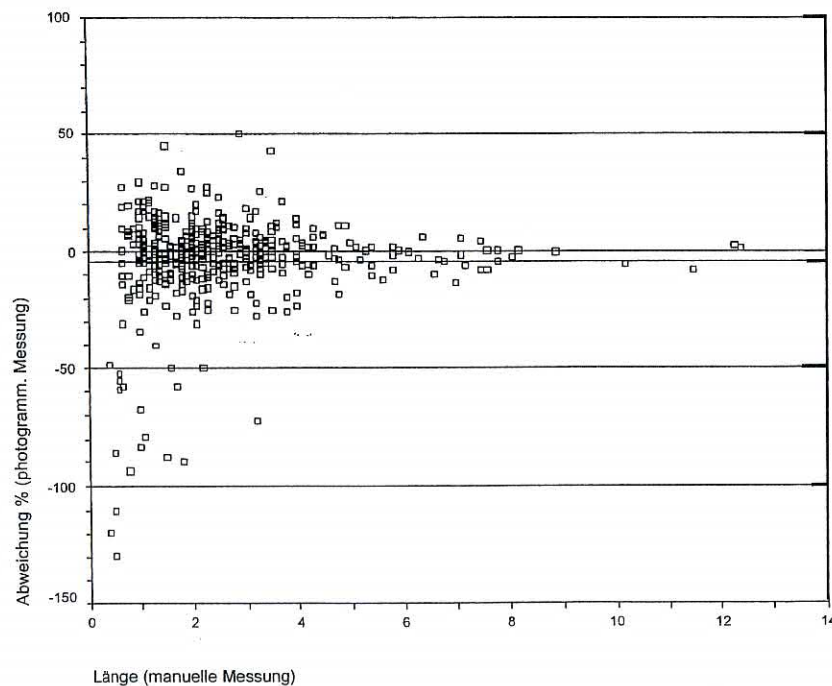


Abb. 5. Länge der Segmente bei manueller Messung (cm) und prozentuale Abweichung der photogrammetrischen Messung.  
Length of the segments as obtained by manual measurement and percental deviation of the photogrammetric measurement.

In der praktischen Anwendung interessieren diese theoretischen Einzelwerte weniger. Hier ist vielmehr die Fragestellung von Bedeutung, wie genau mit der beschriebenen Methode einzelne Baumabschnitte vermessen werden können. Zur Einschätzung der folgenden Ergebnisse bezüglich der Messgenauigkeit ist zu beachten, dass eine normale manuelle Messung als Referenz herangezogen wird: Die Länge der einzelnen Segmente wird dazu mit einem angelegten Maßband gemessen, was natürlich ebenfalls deutliche Ungenauigkeiten beinhaltet. Dennoch wird die händische Datenerfassung – als momentan gängiges Verfahren – im Folgenden als Referenzwert herangezogen.

Abbildung 5 stellt für ein Teilkollektiv der im Rahmen des Projektes untersuchten Pflanzen den prozentualen Unterschied zwischen manueller und photogrammetrischer Messung der Segmentlänge dar. Es ist deutlich sichtbar, dass insbesondere bei kurzen Segmentlängen (um und unter 1 cm) größere Fehler auftreten. Die beiden Messvarianten nähern sich aber bei zunehmenden Segmentlängen immer weiter an. Zum einen gehören zu den kürzeren Segmenten oftmals die Knospen, welche auf den Fotos schwerer zu erkennen und zu markieren und infolgedessen ungenau erfasst werden. Zudem sind die Ansatzpunkte „Segmentanfang“ und „Segmentende“ auf der Pflanze nicht eindeutig anvisierbar, daher treten zwangsläufig Messunterschiede im Millimeterbereich auf, unabhängig davon, wie lang das Segment ist. Dieser Messfehler wirkt sich bei kurzen Segmenten prozentual deutlich höher aus. Im Zweifelsfall ermöglicht die photogrammetrische Messung hier sogar die besseren Ergebnisse, da auf den Fotos problemlos die Verzweigungsmittelpunkte angepeilt werden kann. Auf die ganze Pflanze beziehungsweise Triebblänge bezogen, gleicht sich dieser Messfehler aus.

Die Betrachtung der Genauigkeit bei der photogrammetrischen Messung der Sprossbasisdurchmesser, welche bei Baumpflanzen der untersuchten Größenordnung typischerweise zwischen 0,5 und 2 cm betragen, ergibt folgendes Bild: Im Vergleich zur kreuzweisen manuellen Vermessung mit der Schublehre treten Ungenauigkeiten von bis zu 30 % (durchschnittlich 12,2 %) auf, wobei hier die photogrammetrische Messung meist zu einer Überschätzung führt. Dies ist begründet durch das mit der Kameraauflösung verbundene „Auswaschen“ der Sprosskonturen bei der erforderlichen hohen Zoomeinstellung. Aktuelle, höher auflösende Digitalkameras verbessern insbesondere auch unter diesem Aspekt die erreichbare Genauigkeit deutlich.

Insgesamt lässt sich trotz der beschriebenen Ungenauigkeitsquellen sagen, dass mit der photogrammetrischen Vermessung Ergebnisse erzielt werden, welche mit den konventionellen Messmethoden zumindest vergleichbar sind. Bei zunehmender Größe der zu vermessenden Strukturen ist zudem mit einer erhöhten relativen Genauigkeit zu rechnen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In vorliegendem Artikel wird eine mögliche Einsatzvariante der photogrammetrischen Triangulation bei der Vermessung forstlicher Baumpflanzen vorgestellt. Das Verfahren kann je nach Ansprüchen an das zu erhebende Datenmaterial abgewandelt werden. Die beschriebene Vorgehensweise ist nur als eine von mehreren Einsatzoptionen zu sehen, bei der – unter Inkaufnahme eines entsprechenden Zeitaufwandes – umfassende räumliche Informationen über die Baumpflanze gewonnen werden. Einfacheres Datenmaterial kann hingegen in entsprechend angepassten Messszenarien auch deutlich schneller erhoben werden. So sind zum Beispiel bei dem momentan am Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung laufenden Messungen an Jungpflanzen für das ZEUS-Projekt (Felbermeier 1999) nur Trieb- und Wurzellängen sowie der Wurzelhalsdurchmesser von Interesse. Deswegen kann ein erheblich reduzierter Messaufwand betrieben werden kann.

Grundsätzlicher Vorteil ist, dass die Messung vollkommen berührungs- und zerstörungsfrei erfolgt. Das Verfahren kann dabei sowohl unter Labor- als auch unter Feldbedingungen eingesetzt werden. Insbesondere bei Außenaufnahmen ist es von Vorteil, dass sich diese weitgehend auf das Fotografieren beschränken. Die eigentlichen Messarbeiten können an jedem Arbeitsplatz-PC vorgenommen werden. Bei nachträglich auftretenden Unklarheiten können diese – im Gegensatz zur Handmessung – aufgrund des archivierten Bildmaterials jederzeit geklärt werden.

Die erreichbare Genauigkeit ist, gerade in Anbetracht der Ungenauigkeiten, die bei der manuellen Vermessung auftreten, mehr als ausreichend, um verwertbare Daten zu bekommen. Die beschriebene Vermessung mit NURBS-Kurven dürfte die manuell erreichbare Messgenauigkeit sogar übertreffen. Andere Daten, wie die räumliche Lage von Einzelsegmenten oder Verzweigungswinkel, lassen sich auf konventionelle Art und Weise ohnehin nicht oder nur mit erheblichem Aufwand in vertretbarer Genauigkeit erheben.

Allerdings muss es sich bei den zu vermessenden Objekten prinzipbedingt um gut einsehbare Objekte handeln. Eine Erfassung der Struktur bis hin zur Einzelknospe, wie vorangehend beschrieben, stellt sich im belaubten Zustand als deutlich komplexer bis unmöglich dar. Volumen- und Massedaten lassen sich nur indirekt über Regressionen errechnen.

Als eine interessante Option bietet sich der Einsatz der Photogrammetrie auch bei der Vermessung bestimmter Parameter an größeren Bäumen an, wie in den bereits angesprochenen Arbeiten von Hendrich (1997) beziehungsweise Hengl et al. (1997) geschehen. Analog zum Einsatz der Stereophotogrammetrie bei Reidelstürz (1997) zur Vermessung von Stichprobenpunkten könnten dieselben Resultate auch durch photogrammetrische Triangulation gemessen werden (unter anderem Baumhöhen, Schaftdurchmesser etc.). Die Mehrbildtriangulation bietet hier jedoch den Vorteil, dass im Gegensatz zur Stereophotogrammetrie auf spezielle, teure Auswertegerätschaften verzichtet werden kann.

## Literatur

- Aho, A., Ullmann, J. 1996. Informatik - Datenstrukturen und Konzepte der Abstraktion. Thomson Publishing Company, 1042 S.
- Ammer, C. 2000. Untersuchungen zum Einfluss von Fichtenaltbeständen auf die Entwicklung junger Buchen. Berichte aus der Holz- und Forstwirtschaft. Shaker Verlag
- EOS Systems (Hrsg.) 2000. Photomodeler Pro 4.0 User Manual. 21st Edition. Selbstverlag, Vancouver
- Felbermeier, B. 1999. ZEUS: Forschung für eine zukunftsorientierte Forstwirtschaft. In: Bayerische Staatsforstverwaltung, Forstinfo 16/99, 2-3
- Finish Society of Forest Science (Hrsg.) 1997. *Silva Fennica - Special Issue on Functional-Structural Tree Models* 31(3)
- Godin, C., Costes, E., Sinoquet, H. 1999. A method for describing plant architecture which integrates topology and geometry. In: *Annals of Botany* 84, 343-357, 343-357
- Hendrich, C. 1997. Eine photogrammetrische Methode zur Vermessung von Baumkronen. Diplomarbeit an der Universität Regensburg und am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der LMU München
- Hengl, T., Krizan, J., Kusan, V. 1997. STABLO 3D. Program za izmjernu pojedinačnih stabala primjenom terestricke fotogrametrije [TREE3D. Program for measurement of individual trees using close range photogrammetry]. In: *Mehanizacija Sumarstva* 22 (3), 141-147
- INRA (Hrsg.) 1998. Second international workshop on functional-structural tree models. provisional programme and abstract book. Selbstverlag, Clermont-Ferrand
- Kraus, K. 1996. Photogrammetrie. Verfeinerte Methoden und Anwendungen. 3. Auflage, Ferd. Dummlers Verlag, Bonn
- Kraus, K. 1997. Photogrammetrie. Grundlagen und Standardverfahren. 6. Auflage, Ferd. Dummlers Verlag, Bonn
- Pratsch, S. 1991. Anwendungsmöglichkeiten des fotografischen Systems Elcovision 10 im forstlichen Meß- und Versuchswesen. Diplomarbeit Forstwiss. Fakultät Ludwig-Maximilians-Universität München
- Reidelstürz, P. 1997. Forstliches Anwendungspotential der terrestrisch-analytischen Stereophotogrammetrie. Inaugural-Dissertation Forstwiss. Fakultät Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Riedel, A. 2000. Dreidimensionale Vermessung von Baumpflanzen. *Forstarchiv* 71, 95-101
- Room, P.M., Mailette, L., Hanan, J.S. 1994. Module and metamer dynamics and virtual plants. In: Begon, M., Fitter, A.H. (Hrsg.). *Advances in Ecological Research* 25, 105-157
- Sinoquet, H., Rivet, P. 1997. Measurement and visualisation of the architecture of an adult tree based on a three dimensional digitising device. *Trees* 11(5), 265-270

## Internet-Adressen

- [1] Sonderforschungsbereich 607 der DFG:  
[http://www.forst.tu-muenchen.de/LST/BOTANIK/PROJEKTE/SFB/sfb\\_607.htm](http://www.forst.tu-muenchen.de/LST/BOTANIK/PROJEKTE/SFB/sfb_607.htm)
- [2] Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der TU München (Teilprojekt B3):  
<http://www.forst.tu-muenchen.de/EXT/LST/WALDB/mitarbeiter/riedel/riedel.html>
- [3] Produktbeschreibung der Kodak DC 265  
<http://www.kodak.com/US/en/digital/cameras/dc265/index.shtml>
- [4] Photogrammetrie-Software Photomodeler Pro  
<http://www.photomodeler.com>

