

## Dreidimensionale Vermessung von Baumpflanzen

Alexander Riedel

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

**Kurzfassung:** Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 607 der DFG soll ein Verfahren entwickelt werden, um sowohl Punkt- (Pflanzenstruktur) als auch Volumen- und Oberflächendaten verschiedener Nutzpflanzen dreidimensional und zerstörungsfrei zu erfassen. Als geeignete Verfahrensweisen hierfür sind verschiedene photogrammetrische Methoden angedacht. Insbesondere soll hier der Einsatz des Silhouettenschnittverfahrens beschrieben werden. Bei diesem Verfahren wird ein Volumenmodell des zu erfassenden Objektes anhand der aus verschiedenen, bekannten Kamerapositionen aufgenommenen Silhouetten erstellt.

Für verschiedene Teilaspekte der gegebenen Problemstellung erscheint dieses Verfahren als gangbare Methode, insbesondere unter Berücksichtigung der sich abzeichnenden weiteren Verbesserungsmöglichkeiten. Gerade zur Volumen- (außer bei Blättern) und Oberflächenbestimmung ist das Verfahren geeignet. Auch Punktdaten (Baumstruktur) können erfasst werden, allerdings stellt sich hier die Frage, ob diese weniger komplexen Daten nicht durch Mehrbildtriangulation oder ähnliche Verfahren effektiver gewonnen werden können. Insbesondere bei der Vermessung größerer und insbesondere nicht transportabler Objekte zeigt das Silhouettenschnitt beim jetzigen Stand der Technik allerdings noch Schwächen.

### Three-dimensional measurement of tree plants

**Abstract:** Within the Special Research Project 607 it is planned to develop a method for non-destructive gathering three-dimensional data of volumes and surfaces as well as of point-data (e.g. plant structure) of different useful plants. Several methods of photogrammetry are supposed to be suitable for this task. This paper describes the employment of the so-called „silhouette-cut“-method. This procedure calculates a volume model of a given object by means of its silhouettes, taken from different, known camera positions.

This method seems to be an applicable solution for several aspects of the given problem, especially considering the inherent possibilities for further improvements. The procedure is in particular apt for measuring volumes (except leaves) and surface areas. Point data (tree structure) can be read in, too. It has to be considered, however, whether these simpler data cannot be gathered more effectively by means of multi-picture triangulation or a similar method. Yet, especially when measuring larger and immobile objects, the silhouette-cut method still shows weaknesses at the moment.

**Key words:** 3D-measurement, measurement of biomass, room allocation, silhouette-cut method, photogrammetry

### 1 Zielsetzung

Hauptthema des Sonderforschungsbereiches 607 der DFG („Wachstum oder Parasitenabwehr?“) ist der Wettbewerb um Ressourcen bei Nutzpflanzen in der Land- und Forstwirtschaft, also in anthropogen geprägten Systemen. Insbesondere soll ermittelt werden, ob Pflanzen in Stresssituationen die interne Ressourcenallokation eher zu Gunsten der Parasitenabwehr oder zu Gunsten des Wachstums gestalten (weitere Informationen zum SFB unter der Internet-URL [1]).

Für diverse Untersuchungen im Rahmen der verschiedenen Teilprojekte dieses Forschungsverbundes wird auch ein Verfahren zur zerstörungsfreien Bestimmung der Raumbesetzung durch ober- und unterirdische Biomasse benötigt. Zu diesem Zweck wird am Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der Technischen Universität München das Teilprojekt B3 (Internet-URL [2]) bearbeitet. Ziel dabei ist es, angelehnt an bereits bekannte dreidimensionale Messmethoden aus anderen Fachbereichen, eine Methode zur räumlichen Vermessung von Baumpflanzen – in späteren Projektabschnitten sind auch andere Pflanzen anvisiert – zu entwickeln. So soll es ermöglicht werden, zerstörungsfrei deren räumliche Daten zu gewinnen und diese über einen längeren Entwicklungszeitraum hin beobachten zu können. Dazu zählen unter anderem Angaben über die Verzweigungsstruktur, die Länge und Anzahl von Trieben und Wurzeln sowie insbesondere die räumliche Verteilung von Oberfläche, Masse und Volumen der verschiedenen Biomassefraktionen.

### 2 Möglichkeiten der Gewinnung von räumlichen Objektdaten

In zahlreichen Branchen zählt die automatisierte Vermessung von diversen Gegenständen schon seit längerem zu den Standardverfahren. Bei der Auswahl eines auch für den forstlichen Bereich geeigneten Messverfahrens für die gegebene Aufgabenstellung sind allerdings einige Besonderheiten des Messobjektes „Baum“ zu beachten: Bei organischen Objekten handelt es sich, im Gegensatz zu den meist vermessenen künstlichen Gegenständen, um komplexe Gebilde ohne klar definierte, leicht zu erfassende geometrische Ecken und Kanten. Außerdem sind in den meisten Fällen viele Überdeckungen und Überschneidungen vorhanden. Insbesondere bei optischen Messverfahren bedeutet dies zahlreiche Quellen für Ungenauigkeiten, da bei dieser Methodik prinzipiell nur einsehbare Objektbestandteile vermessen werden können. Die zahlreichen zu vermessenden Details bewirken zudem ein außerordentlich hohes Datenaufkommen. Ein weiteres Manko der existierenden Verfahren ist, dass sie für den stationären Bereich optimiert sind, während ein Einsatz in der forstlichen Praxis oftmals einen robusten, mobilen Einsatz außerhalb der definierten Verhältnisse einer Fertigungsanlage erforderlich macht.

Grundsätzlich sind Verfahren zur Gewinnung der räumlichen Daten einzelner Punkte und solche zur Erfassung von Volumendaten zu unterscheiden. Sobald es nämlich nicht nur um die Erfassung einzelner Punkte, sondern um komplette

Oberflächen und insbesondere Volumina geht, erweisen sich zahlreiche räumliche Messverfahren als denkbar ungeeignet. So ist es gerade bei derart komplexen Objekten wie Bäumen praktisch unmöglich, „per Hand“, sämtliche das zu vermessende Volumen begrenzenden Punkte zu erfassen. Jede Volumenberechnung muss in solchen Fällen deswegen auf Modellierungsansätze zurückgreifen (vergleiche dazu u. a. Finish Society of Forest Science 1997 und INRA 1998).

Gerade zur einfachen Erfassung der dreidimensionalen Punktdaten existieren allerdings, abgesehen von der klassischen Vermessung „per Hand“, bereits zahlreiche Ansätze. Viele davon haben sich auch schon bei der Vermessung verschiedener Pflanzenarten bewährt. Zu nennen sind hier u. a. Magnetfeldmessungen (Vermessung der Struktur eines Walnussbaumes durch die INRA – siehe hierzu u. a. Sinoquet u. Rivet 1997) und Schallfeldmessungen (Vermessung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen durch das „Centre for Tropical Pest Management - CTPM“, vergleiche Room et al. 1994 sowie Internet-URL [3]).

Auch passive optische Verfahren (Photogrammetrie) haben sich für einfache Messzwecke in der forstlichen Praxis bereits bewährt (Weber 1900, 1902). Neben der *Einzelbildauswertung* (Dehn et al. 1985), welche für die gewünschte Dreidimensionalität allerdings nicht ausreichend ist, ist hier vor allem die *Stereophotogrammetrie* zu nennen (Vermessung diverser forstlicher Objekte vom Einzelbaum bis zum kompletten Stichprobenpunkt durch Reidelstürz 1997). Nachteil dieser Methode sind jedoch die hohen Kosten, insbesondere für den notwendigen Stereoplotter (i. d. R. mehrere hunderttausend Mark). Weiterhin lässt sich die *Mehrbildtriangulation* (und verwandte Verfahren), bislang vorwiegend eingesetzt z. B. bei der Architektur- und Anlagenvermessung (Kraus 1996, 1997), als effektives und preisgünstiges Verfahren für die zerstörungsfreie Erfassung von räumlichen Punktdaten auch im forstlichen Bereich vorstellen (vergleiche Hengl et al. 1997; Hendrich 1997). Deswegen ist es auch im Rahmen des Projektes B3 geplant, diese Methode ergänzend für die Messung von Punktdaten einzusetzen.

Da die im Rahmen des Projektes zu bearbeitenden Aufgabenstellungen allerdings vorwiegend die Gewinnung von komplexen Volumendaten erfordern, sind grundsätzlich Verfahren sinnvoller, welche diese Messwerte weitgehend automatisiert erfassen können. Neben aktiven optischen Verfahren wie *Weißlicht* oder *Laser*, die sich allerdings in Vorversuchen (durchgeführt u. a. von der Firma Polhemus mit dem „Hand-Held-Laser-Scanner“) – trotz der im industriellen Einsatz erreichbaren hohen Präzision – als für den Einsatz bei der Pflanzenvermessung ungeeignet erwiesen, bietet sich das im Folgenden beschriebene Verfahren des *Silhouettenschnittes* an. Diese Lösung liegt zudem preislich deutlich unter Laser-scannern und verwandten Techniken.

### 3 Prinzipielle Grundlagen des Silhouettenschnittverfahrens

Das Verfahren des Silhouettenschnittes (auch als Volumenschnitt bekannt) ist ein passives photogrammetrisches Verfahren, wie auch die *Stereophotogrammetrie* oder die *Mehrbildtriangulation*: Man versucht, anhand von aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommenen Bildern eines Objektes dessen räumliche Daten zu erhalten.

Bei jedem photogrammetrischen Verfahren ist die verwendete Kamera ein entscheidender Punkt des Verfahrens. Um

exakte Aussagen treffen zu können, müssen sowohl die innere Orientierung der Kamera (Verzerrungen des Bildes auf Grund des Kameraobjektives u. Ä.) als auch die äußere Orientierung, also die Position der Kamera bei der Aufnahme, bekannt bzw. zumindest im Nachhinein berechenbar sein (Kalibrierung, vgl. Kraus 1996, 1997). Bei hochpräzisen Vermessungen kommen hierfür spezielle Messkameras zum Einsatz. Für den vorgesehenen Einsatzbereich erreichen allerdings unter bestimmten Voraussetzungen (nachträgliche Kalibrierung, „inverse camera“-Prinzip, siehe Eos Systems 1997) bereits handelsübliche Fotoapparate eine ausreichende Genauigkeit (Reidelstürz 1997).

Beim Silhouettenschnitt wird aus den aus verschiedenen, bekannten Positionen aufgenommenen Bildern jeweils der Umriss des zu erfassenden Objektes „herausgerechnet“ (um dieses so genannte „Chroma-Keying“ zu vereinfachen, verwendet man meist einen definierten, einfarbigen Hintergrund). Da die Position der Kamera relativ zum Aufnahmeobjekt bekannt ist, kann aus diesen Silhouetten ein Volumenmodell des Körpers erstellt werden. Durch Erhöhung der Anzahl der Aufnahmen und durch Variierung der Parameter des Aufnahmestandortes (unterschiedliche Aufnahmewinkel) lassen sich auch die durch Überdeckungen resultierenden Ungenauigkeiten gerade bei Vermessungen an Baumpflanzen reduzieren. Für komplexere Objekte beziehungsweise höhere Genauigkeit muss somit prinzipiell lediglich die Anzahl der Aufnahmen erhöht werden.

Die Grundlagen des Verfahrens sind im Detail bei Niem (1994, 1999) nachzulesen, zahlreiche weitere Publikationen zu diesem Thema können im Internet (URL: [4]) online abgerufen werden.

## 4 Vermessung von Baumpflanzen mittels Silhouettenschnittverfahren

### 4.1 Aufbau der Messapparatur

Für die Durchführung der Vermessungsversuche wurde die „Scanstation VR+“ der Firma Dimension 3D (Internetadresse: [5]) verwendet. Im Gegensatz zu ebenfalls lieferbaren kleineren Varianten bietet diese „große“ Ausführung für die Vermessung von Baumpflanzen bessere Voraussetzungen hinsichtlich erreichbarer Genauigkeit, Automatisierbarkeit und Robustheit.

Für die Aufnahmen werden von diesem System mehrere Typen von digitalen Kameras unterstützt. Klassische analoge Kameras wären zwar, insbesondere in photogrammetrischen Belangen, den digitalen Modellen bezüglich der Auflösung und Genauigkeit immer noch überlegen, allerdings bieten die digitalen Modelle gerade bei der direkten Weiterverarbeitung im Computer deutliche Vorteile, insbesondere das Entfallen des Filmentwickelns und des anschließend nötigen Einscannens der Abzüge (mit allen damit verbundenen weiteren Ungenauigkeiten) ist hier zu nennen.

In diesem Fall kamen Kameras vom Typ Kodak DC 260/DC 265 zum Einsatz, also keine speziellen Messkameras, sondern handelsübliche Modelle der gehobenen Consumerklasse. Folgende Daten charakterisieren diese Modelle, Genaueres kann im Internet unter [6] nachgelesen werden: Die Verbindung zum Computer zur Bildübertragung und automatischen Ansteuerung erfolgt mittels USB („Universal Serial Bus“). Die Auflösung der Kameras in der höchsten Auflösung liegt im so genannten „Megapixel-Bereich“ (1536 x 1024 Punk-

te). Unverzichtbar für Messanwendungen ist, dass sich sämtliche Automatikfunktionen (v. a. Autofokus) deaktivieren lassen, sodass eine konstante Kalibrierung erreichbar ist. Die Kameras wurden auf einem robusten Stativ positioniert und während eines Messdurchganges nicht mehr weiter verschoben.

Das zu vermessende Objekt wird auf einem Präzisions-Drehteller platziert, der für das „Chroma-Keying“-Verfahren mit einem einfarbigen Filzstoff verkleidet ist. Für normale Anwendungsfälle wird die „Scanstation“ mit einem grünen Hintergrund ausgeliefert, für den Aufgabenbereich „Baumvermessung“ wurde allerdings zur Erreichung eines höheren Kontrastes ein Hintergrund aus blauem Stoff verwendet. Gemäß den technischen Daten des Gerätes können Objekte mit einer Höhe von 80 cm und einem Durchmesser von 50 cm vermessen werden. Da der limitierende Faktor auf Grund des hochwertigen Drehtellers (Tragefähigkeit: 50 kg) allerdings nur die Größe des Hintergrundes ist, konnten durch Erweiterung desselben (siehe Abbildungen) auch höhere Bäume vermessen werden.

Ergänzt wurde diese Versuchsaufstellung durch Halogenscheinwerfer zum Ausleuchten der Szene: Indirekte Beleuchtung reduziert den Schattenwurf und vereinfacht deswegen wiederum den „Chroma-Keying“-Vorgang, da keine störenden Schatten auf dem Hintergrund entstehen. Computerseitig erfolgt die Ansteuerung dieser Apparatur (Kamera über USB, Drehteller und Beleuchtung über serielle RS-232 Schnittstelle) mittels der Software „ScanWare“, die für PCs unter Windows (Linux in Vorbereitung) und SGI-Workstations unter dem Betriebssystem IRIX zur Verfügung steht. Für die Vermessungsversuche wurde die Windows-Variante auf einem handelsüblichen PC (450 Mhz Prozessor, 128 MB RAM) eingesetzt.

Verwendet wurde die Version 1.1 von „Scanware“, allerdings mit einigen von der Firma zur Verfügung gestellten Änderungen (experimentelle Vorabversionen neuer Programmbestandteile). Da das Softwarepaket aus kleinen Einzelprogrammen besteht, die durch eine graphische Oberfläche in der interpretierten Programmiersprache „Tcl/Tk“ vereint werden, waren auch eigene Modifikationen an Parametern und Grenzwerten möglich.

#### 4.2 Vorgehensweise bei der Vermessung

Die Vorgehensweise beim Einscannen von Objekten ist durch die Bedienoberfläche von „Scanware“ bereits weitgehend vorgegeben. Vorbereitend wird zunächst die Videoquelle (Fotoapparat oder Videokamera) direkt vom PC aus auf geeignete Werte für Zoom, Beleuchtung usw. eingestellt. Für die Baumvermessung wurde dabei die höchste Bildauflösung in einem verlustfreien Dateiformat gewählt. Die Automatikfunktionen (interpolierender Zoom o. Ä.) sollten so weit als möglich deaktiviert werden. Zudem muss die Kamera kalibriert werden, zum einen, um Verzerrungen auf Grund des Kameraaufbaus (innere Orientierung) auszuschließen, zum anderen, um die Position der Kamera relativ zum Drehteller bestimmen zu können (äußere Orientierung). Dazu wird ein spezielles Kalibriermuster (siehe Abb. 1) benutzt, von dem an sechs Positionen des Drehtellers Bilder aufgenommen werden. Da die Abmessungen (Abstände der Punkte) des Kalibrierungsmusters bekannt sind, kann die Software dann ohne weitere Eingriffe des Bedieners die Parameter der Kamera innerhalb weniger Minuten automatisch berechnen.

Nach diesen vorbereitenden Schritten erfolgt die eigentliche Vermessung (Abb. 2). Dazu wird festgelegt, wie viele Aufnahmen gemacht werden sollen. In Anbetracht der kom-



Abb.1. Kalibrierung der „Scanstation“ mit einem Kalibrierfeld.  
Calibration of the „Scanstation“ by means of a calibration pattern.

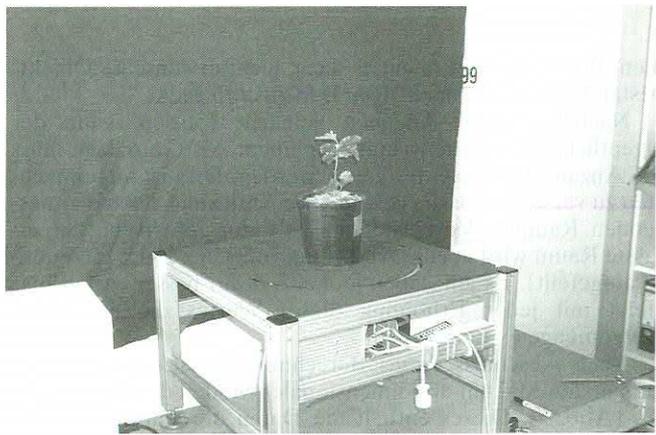


Abb. 2. Einscannen einer kleinen Buchenpflanze.  
Scanning a small beech plant.

plexen Objekte wurde die Voreinstellung von 36 Aufnahmen auf den Maximalwert 72 verdoppelt, also eine Aufnahme alle 5° Tellerrotation. Die Drehung des Tellers erfolgt automatisch durch die Software, allerdings ergab sich insbesondere bei größeren Pflanzen hierbei das Problem, dass diese noch von der ruckartigen Drehung wackelten, während die Kamera bereits die Aufnahme machte. Deswegen wurde in solchen Fällen auf manuelle Steuerung umgeschaltet. Dieser Arbeitsabschnitt dauert bei 72 Aufnahmepositionen etwa eine halbe Stunde. Die Aufnahmen werden direkt über den USB-Anschluss vom Kameraspeicher an den Computer übertragen. Dies ist auch notwendig, da die pro Bild anfallenden Datenmengen (4,5 MB im Bitmap-Format) den Kameraspeicher (PCMCIA- bzw. PC-Card, standardmäßig 16 MB Kapazität) bei mehreren Messdurchgängen schnell überfordern würden.

Anhand eines der aufgenommenen Bilder wird nun der Farbbereich des Hintergrundes durch Markieren eines repräsentativen Bereichs festgelegt und aus allen Bildern die Silhouette des Objektes herausgerechnet („Chroma Keying“, siehe Abb. 3 u. 4). Dabei sind auch manuelle Korrekturen möglich. Dies ist sehr nützlich, um beispielsweise den Topf des Baumes bereits in diesem Schritt durch „Retuschieren“ aus den folgenden, zeitaufwendigen Berechnungen herauszuneh-

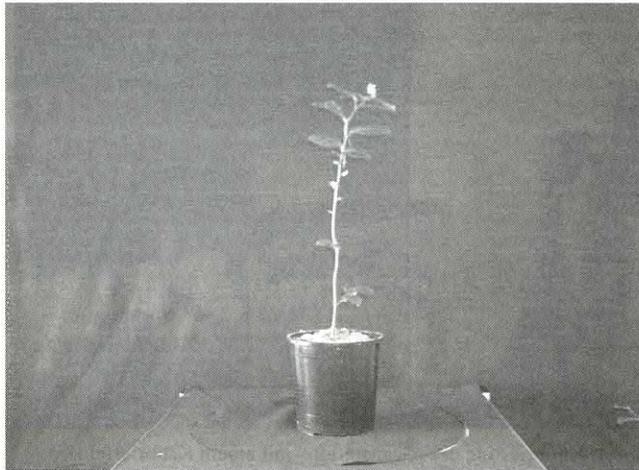
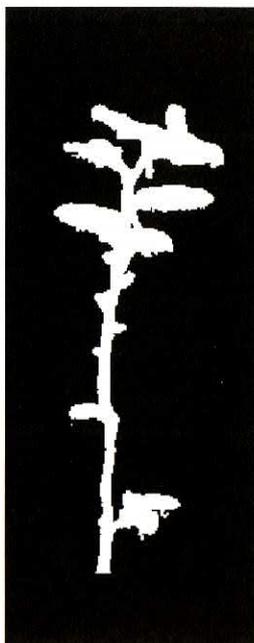


Abb. 3. Eine der bis zu 72 Aufnahmen der zu erfassenden Baumpflanze.  
One of the up to 72 pictures of the tree plant to be scanned.

men. Prinzipbedingt reicht es dazu, nicht erwünschte Objektbestandteile in einem einzigen Bild zu entfernen.

Nachdem diese Angaben gemacht wurden, kann der eigentliche Silhouettenschnitt beginnen: Als Grundlage muss die Anzahl der Voxel festgelegt werden. Dies ist am einfachsten zu verstehen als die gewünschte Auflösung des zu vermessenden Raumes. Voreinstellung ist dafür 256 (d. h., der erfasste Raum wird in eine Auflösung von 256 x 256 x 256 Punkte aufgeteilt). Es gilt dabei: je mehr, desto besser. Allerdings steigt mit jeder Erhöhung dieses Wertes die anfallende Datenmenge exponential an.

Nach Abschluss dieses Berechnungsschrittes erhält man zum ersten Mal ein dreidimensionales Modell des Messobjektes (Abb. 5). Dieses enthält die Daten der Punkte, die das Objekt im Raum begrenzen und wird im programminternen SPX-Format (Spezifikation siehe [5]) abgespeichert. Da diese Beschreibung eines räumlichen Objektes durch die begrenzenden Punkte eher unüblich und deswegen mit gängiger Software schwer weiterzuverarbeiten ist, wird in einem weiteren Schritt ein Oberflächenmodell des Objektes gebildet: Die Punkte werden durch Dreiecksflächen verbunden („Triangulation“). Auch hier sind vor der Berechnung Angaben zur



◀Abb. 4. Die zugehörige Silhouette. Die Störeffekte am linken Bildrand werden im Laufe der weiteren Bearbeitung automatisch herausgerechnet. Erkennlich ist außerdem, dass der Topf bereits per Hand gelöscht wurde, da er für die weiteren Berechnungen nicht von Interesse ist.

The corresponding silhouette. The "noise" on the left edge of the picture will be removed automatically in the course of the following calculations. It can also be seen that the pot, which is of no interest for the results, has already been removed manually.



Abb. 5. Volumenmodelle des gescannten Baumes nach dem Silhouettenschnitt, können mit einem speziellen Anzeige-Programm oder einem Plugin-In für Webbrowser angezeigt werden.

Volume models of the scanned tree after the silhouette cut, can be displayed with a special viewer-software or a plug-in for webbrowsers.

erwünschten Genauigkeit wählbar (Maximalgröße der Dreiecke, akzeptierter maximaler Fehler bei der Erstellung der Dreiecke).

Im abschließenden Schritt kann das Objekt noch mit Texturen versehen werden, das bedeutet, die aus den Fotos extrahierten Informationen über die Farben der jeweiligen Oberflächen können in das Modell mit einbezogen werden. Erst nach diesem Schritt ist ein Export des entstandenen dreidimensionalen Baummodells nicht nur im SPX-, sondern auch in gängigen Formaten wie DXF (3D-Datenformat der Software „AutoCAD“) und VRML (üblich für dreidimensionale Internet-Darstellungen) möglich.

#### 4.3 Besonderheiten bei der Vermessung von Baumpflanzen

Voranehend wurde die unter Normalbedingungen anwendbare Vorgehensweise dargestellt. Im Zusammenhang mit der Aufnahme von Baumpflanzen stellte sich die Arbeit allerdings etwas komplizierter dar, da der Computer, zumindest unter dem Betriebssystem Windows 98, mit den anfallenden Datenmengen überfordert war. Ab der Triangulation führte die Datenmenge regelmäßig zu Abstürzen des Betriebssystems beziehungsweise zu Fehlfunktionen der verschiedenen „ScanWare“-Teilprogramme.

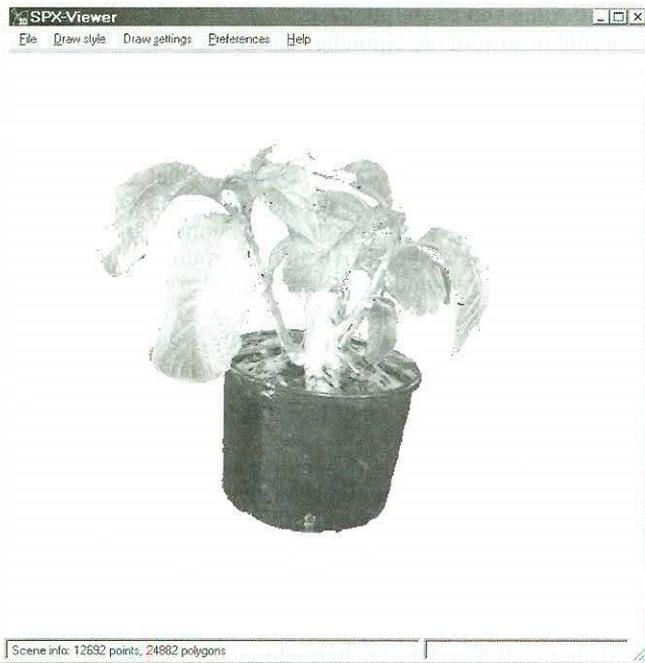


Abb. 6. 3D-Modell einer mit der „Scanstation“ vermessenen Topfpflanze mit Texturen.  
3D-model with textures of a potted plant scanned with „Scanstation“.

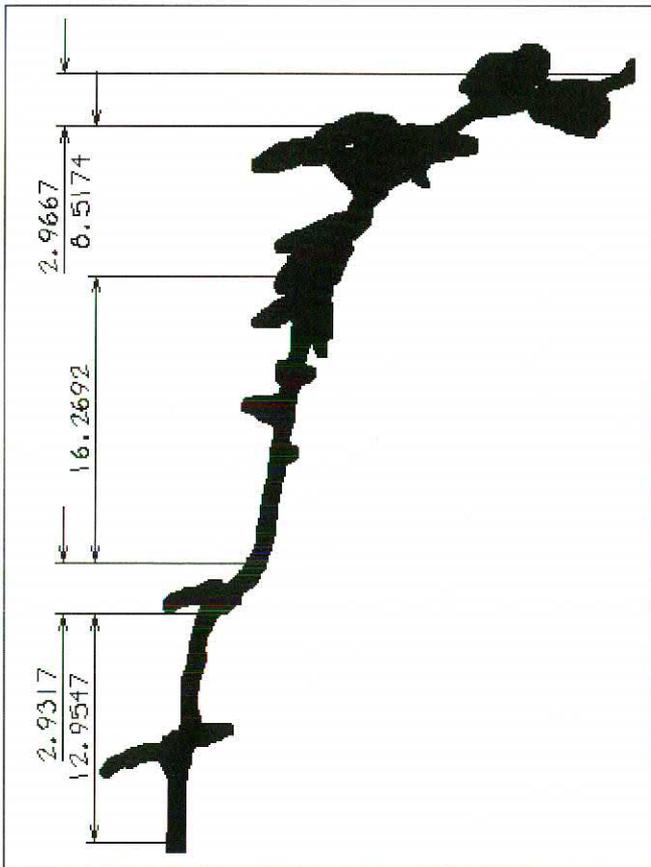


Abb. 7. Vermessung von Sprossabschnitten.  
Measurement of shoot sections.

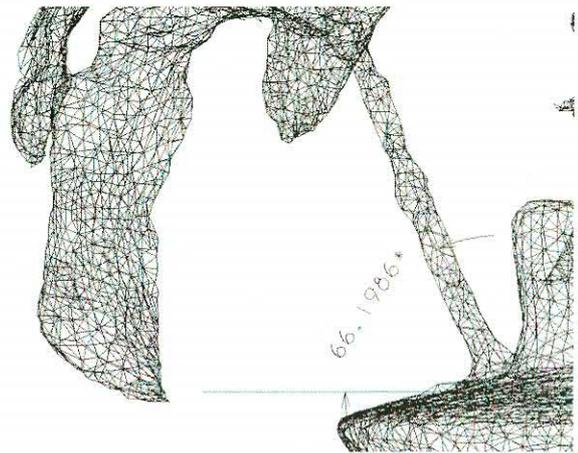


Abb. 8. Winkelmessung.  
Measurement of angles.

Als Anhalt für die anfallenden Datenmengen sei der abgebildete Baum genannt: Berechnet mit einer Voxelauflösung von 256 (Vorgabe), besteht er aus über 7000 Punkten, bei der doppelten Auflösung (512) bereits aus 30.000 Punkten und bei einer Auflösung von 728 aus über 62.000 Einzelpunkten. Auf Grund der feinen zu erfassenden Details ist allerdings grundsätzlich eine noch höhere Voxelauflösung wünschenswert, da ansonsten feinere Teile der Pflanze wie z. B. dünnere Äste bei der Berechnung ausgelassen werden könnten. Bei der anschließenden Triangulation findet dann eine weitere Vervielfachung der Datenmenge statt. Daher gelang es nur selten, einen kompletten Scandurchgang bis hin zur Texturierung durchzuführen. Beispielhaft zeigt Abbildung 6 eine komplett erfasste und mit Texturen versehene, getopfte Nutzpflanze.

Weiterhin erweist sich das Vermessen der Wurzeln als problematisch: Diese müssen natürlich zuallererst freigelegt und gesäubert werden. Schon in diesem Schritt gehen wichtige Daten über die tatsächliche räumliche Ausbreitung im Erdreich unvermeidlich verloren. Aber auch bei der Erfassung der freigelegten Wurzeln stößt man auf Hindernisse: Zwar konnte durch die Verwendung eines Stativs die Problematik der Platzierung auf dem Drehteller gelöst werden, eine Erfassung, auch mit hoher Auflösung, ergab allerdings nur eine relativ undifferenzierte Punktwolke, die für keine weiteren Berech-

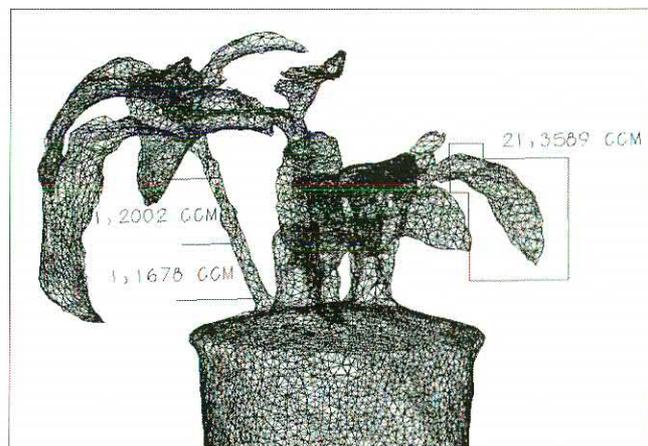


Abb. 9. Vermessung der Volumina von Blättern und Astabschnitten.  
Measurement of volumes of leaves and branch sections.

nungen geeignet war. Hier stößt die momentan erreichbare Auflösung des Systems deutlich an seine Grenzen.

Das Problem der Verarbeitung der anfallenden Datenmenge lässt sich auf mehrere Weisen lösen: Als provisorische Lösung ist es zum einen möglich, den Baum nach erfolgter Erfassung für die Weiterverarbeitung „virtuell“ in kleinere, separat zu berechnende Teilabschnitte zu zerlegen.

Weiterhin bietet es sich an, da ja schon nach dem Silhouettenschnitt verwertbare räumliche Daten vorliegen (allerdings nur in einem programminternen Format), mit diesen Rohdaten weiterzuarbeiten. Dadurch erspart man sich zudem die zeitaufwendigen und für die angestrebten Messzwecke ohnehin sekundären Folgeschritte der „Triangulation“ und der „Texturierung“. Mittels eines zusätzlichen Konvertierungsprogrammes können die SPX-Rohdaten ins DXF-Format umgewandelt werden und mit einem externen 3D-CAD-Programm (im Rahmen der Arbeit wird dabei „Bentley Microstation 95/SE“ eingesetzt, vgl. [7]) bearbeitet werden.

Bei der Übernahme der absoluten Koordinaten treten allerdings kleinere Probleme auf. So muss die vermessene Baumpflanze teilweise manuell in des Koordinatensystem des CAD-Programmes eingepasst werden und beim DXF-Import der richtige Maßstab eingestellt werden. Weiterhin ist es für manche Verarbeitungsschritte problematisch, dass „Microstation“ die einzelnen Punkte des importierten Modells nicht als Punkte, sondern als Linie mit der Länge 0 interpretiert. Dies lässt sich allerdings durch entsprechende Programmierung in der Makrosprache des CAD-Programmes umgehen.

## 5 Ergebnisse

Das im Rahmen des SFB-Projektes zu entwickelnde Verfahren soll eine Vielzahl an verschiedenen Daten von Nutzpflanzen erfassen. Neben der reinen Visualisierung ist dabei nicht der Gewinnung von reinen Punktdaten, sondern auch die Ermittlung von komplexen Volumen- und Oberflächendaten ein entscheidender Bestandteil der Aufgabenstellung.

Für die Erfassung der komplexen Volumendaten bietet zum Beispiel das beschriebene photogrammetrische Verfahren des Silhouettenschnittes, unter Berücksichtigung der systembedingten Einschränkungen, einige Möglichkeiten. Da die gemessenen Daten in einem Standardformat exportiert werden, können sie mit allen in handelsüblichen CAD-Programmen zur Verfügung stehenden Werkzeugen bearbeitet werden. Je nach verwendeter Software stehen damit sowohl Funktionen zur Verfügung, um die Koordinaten und Entfernungen einzelner Punkte abzufragen, bis hin zu komplexeren Werkzeugen zur Berechnung von Volumen- und Oberflächendaten. In Abbildung 9 sieht man so z. B. die Vermessung von Volumina mittels der entsprechenden Funktion der CAD-Software. Auch einzelne Astabschnitte (Abb. 7) und Winkel (Abb. 8) können so leicht vermessen werden.

In der genannten Konstellation müssen die zu vermessenden Pflanzen allerdings transportabel sein, also ist das Verfahren am besten zur Vermessung von getopften Pflanzen geeignet. Dies ist bei den im Rahmen des SFB untersuchten Pflanzen in den Gewächshäusern und Phytotronen auch der Fall. Ansonsten gibt es kaum Beschränkungen bezüglich der Pflanzengröße und der räumlichen Ausdehnung, es ist lediglich damit zu rechnen, dass die Genauigkeit bei zunehmendem Abstand Kamera – Objekt geringer wird. Somit kristallisiert es sich zum bisherigen Zeitpunkt heraus, dass mit dem beschriebenen 3D-Erfassungsverfahren folgende Ziele zu erreichen sind:

### Visualisierung von Einzelpflanzen

Dazu zählen sowohl die einmalige Erfassung einer Pflanze als Momentaufnahme als auch in bestimmten Zeitabständen wiederholte Aufnahmen von verschiedenen Entwicklungsphasen zur Dokumentation des Wachstums. Die Visualisierung könnte somit auch für retrospektive Analysen und als Grundlage für Mustererkennung dienen. Dabei kommt es auf die exakten Messwerte weniger an als auf die übersichtliche Darstellung. Wie an den obigen Abbildungen gut erkennbar ist, lässt sich dieses Ziel mit dem beschriebenen Verfahren weitgehend erreichen. Entsprechende Rechnerkapazität und Betriebs-systemausstattung vorausgesetzt, reicht diese Visualisierung bis hin zur realitätsnahen Darstellung durch den Einsatz von Texturen.

### Vermessung von Volumen und Oberflächendaten von verschiedenen Pflanzenteilen

Wie bereits angesprochen, können im CAD-Programm zudem relativ leicht Volumen- und Oberflächenwerte von einzelnen Biomassefraktionen bestimmt werden. Die unterirdische Biomasse scheidet allerdings momentan aus den oben beschriebenen Gründen noch aus – hier reicht einfach die Auflösung des Systems noch nicht aus, um die feinen Details zu erfassen.

Auch sind die bei der Vermessung von Blättern gewonnenen Daten mit Vorsicht zu betrachten: Die gewölbte Form führt in diesem Fall zu deutlichen Überschätzungen des Volumens, da – je nach Perspektive der Aufnahmen – die konkav geformte Blattunterseite nicht als solche erfasst wird. Die Volumina von Astabschnitten hingegen lassen sich relativ genau bestimmen (vergleiche Abb. 9). Die Form von Stamm und Ästen, meist als mehr oder weniger senkrecht verlaufende Zylinderabschnitte anzunähern, kommt dem verwendeten Scanverfahren andererseits entgegen.

Freilich geben die reinen Volumendaten noch keinerlei Aufschluss über die tatsächliche Biomasse. Es lässt sich aber zurzeit auch keine andere zerstörungsfreie Methode denken, hierüber Aufschluss geben könnte. Deswegen ist angestrebt, zur Gewinnung dieser Werte ein Verfahren zu entwickeln, um von den gemessenen Volumina auf die Masse der jeweiligen Biomassefraktionen zu schließen.

Als weiterer Ausblick sei die Möglichkeit genannt, mittels Texturen auch weitergehende Oberflächeninformationen der Pflanzen zu erfassen. Entsprechende Bildbearbeitungssoftware vorausgesetzt, könnten dadurch auch Nekrosen oder andere anhand der Färbung identifizierbare Schäden quantifiziert werden.

### Erfassung von Punktdaten – Lage und Orientierung im Raum

Da mittels CAD-Programmen auch einzelne Punkte zu vermessen sind, stellt diese Aufgabenstellung keine Probleme dar. Über Verbindungslinien zwischen diesen Punkten können dann auch Achsen, Winkeln, Längenangaben usw. abgegriffen werden (vgl. Abb. 7 u. 8). Allerdings dürften für die Erfassung reiner Punktdaten die *Stereophotogrammetrie* (Reidelstürz 1997) oder insbesondere die Mehrbildtriangulation, die deswegen anschließend kurz beschrieben werden soll, die deutlich effektiveren (und zudem teilweise bereits praxiserprobten) Lösungen darstellen.

Bei der *Mehrbildtriangulation* werden, stark vereinfacht formuliert, mehrere (d. h. mindestens zwei, mehr erhöhen die Genauigkeit) Fotos des zu vermessenden Objektes aus verschiedenen, frei wählbaren Winkeln gemacht. In der zugehörigen Software werden dann die identischen Punkte auf mehreren Bildern gekennzeichnet und auf diese Weise deren räumlichen Koordinaten berechnet. Somit hat dieses Verfahren

zusätzlich den Vorteil, dass auch stationäre, beliebig große Objekte vermessen werden können. Eine automatisierte Volumenerfassung allerdings ist bei der Vermessung von organischen Objekten mittels der Mehrbildtriangulation nicht möglich, die Punkte müssen alle einzeln auf den Bildern markiert werden.

## 6 Ausblick

Der größte Nachteil des beschriebenen Verfahrens ist, dass es in der gegenwärtigen, stationären Form nur bewegliche Objekte erfassen kann. Dies stellt in vielen Fällen eine enorme Einschränkung dar. Allerdings ist das Verfahren prinzipiell auch umkehrbar: Statt eines bewegten Objektes und einer ortsfesten Kamera kann auch die Kamera um das feststehende Objekt bewegt werden. Niem [4] schlägt hierbei zur Kalibrierung der Kamera, die in diesem Fall bei jedem einzelnen Foto erneut erfolgen müsste (äußere Orientierung geändert), einen um das Objekt gelegten Ring mit Kalibriermuster vor. Wenn dieser Ring auf jedem Bild abgebildet ist, kann geeignete Software hieraus die Kalibrierdaten der Kamera problemlos berechnen. Allerdings ist momentan noch kein derartiges System einsatzbereit.

Eine weitere Verbesserung der Methodik hat bereits Eingang in die Scan-Software gefunden: In der aktuellen Version 1.3 von „Scanware“ kann das zu vermessende Objekt in mehreren Durchgängen in verschiedenen Positionen (z. B. stehend/liegend) erfasst werden. Durch den so erreichbaren variableren Aufnahmewinkel erhöht sich die Genauigkeit bei schwer einsehbarer Objektbestandteilen deutlich. Eventuell kann auf diese Weise das Problem der fehlerhaft erfassten Blätter, unter Inkaufnahme eines erhöhten Zeitaufwandes, gelöst werden.

Zahlreiche der bei den Messungen zutage tretende Unzulänglichkeiten lassen sich auf unzureichende Rechnerleistung zurückführen. Auf dem Gebiet der Computerbranche findet allerdings bekanntermaßen gegenwärtig ein rasender Fortschritt statt. Zusammen mit den kaum weniger sprunghaften Fortschritten im Bereich der digitalen Fotografie – immer höhere Auflösungen (und damit Genauigkeit) werden zu vertretbaren Preisen verfügbar – lässt dies darauf hoffen, dass ein Vermessungsverfahren nach dem beschriebenen Prinzip bald auch allgemein problemlos anwendbar sein wird. So könnte das Herausrechnen des Objekthintergrundes, welcher gegenwärtig noch einen homogenen Hintergrund für das „Chroma-Keying“ voraussetzt, durch den Einsatz von leistungsfähiger Bildbearbeitungssoftware automatisiert und deutlich flexibler gehandhabt werden.

Nachdem bereits gezeigt wurde, dass die Photogrammetrie ein nützliches Hilfsmittel für die Forstwissenschaft sein kann (u. a. Reidelstürz 1997; Hengl 1997; Pratsch 1991), könnte sich – eine weitere technische Reifung der notwendigen Hard- und Software vorausgesetzt – auch dem beschriebenen Verfahren ein Anwendungsfeld in der forstwissenschaftlichen Forschung auftun.

## Quellenangaben

Internet-URL:

- [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] Projekt B3 am Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung  
<http://www.forst.tu-muenchen.de/LST/WALDBAU/alex/b3abstract.html>

- [3] Projekt „Virtual Plants“ des CTPM  
<http://www.ctpm.uq.edu.au/virtualplants/InsectPlant.html>
- [4] Publikationen des Instituts für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung Hannover  
<http://www.tnt.uni-hannover.de/project/3dmod/multview/publications.html>
- [5] Dimension3D  
<http://www.dimension3d.de/>
- [6] Produktbeschreibung der Kodak DC 265  
<http://www.kodak.com/US/en/digital/cameras/dc265/index.shtml>
- [7] 3D-CAD Programm Bentley Microstation  
<http://www.bentley.de/>

## Literatur

- Dehn, R.; Taube, D.; Sloboda, B. 1985. Schaftvermessung an stehenden Bäumen mit einem eindimensionalen Paßpunktsystem. *Allg. Forstz.* 40, 350–353.
- Dimension3D. 1999. Scanware 1.1 for Windows 95/NT 4.0. Selbstverlag, Hannover. 41 S.
- EOS Systems. 1997. Photomodeler Pro User Manual. 12. Auflage. Selbstverlag, Vancouver B.C. 389 S.
- Finish Society of Forest Science (eds.). 1997. *Silva Fennica – Special Issue On Functional-Structural Tree Models*, Vol 31, 380 p.
- Hendrich, C. 1997. Eine photogrammetrische Methode zur Vermessung von Baumkronen. Diplomarbeit Univ. Regensburg u. Lehrstuhl f. Waldwachstumskunde LMU München, 181 S.
- 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]. *Mehanizacija Sumarstva* 22, 141–147.
- INRA (ed.). 1998. Second International Workshop on Functional-Structural Tree Models. Provisional Programme and Abstract Book. Selbstverlag, Clermont-Ferrand, 95 p.
- Kraus, K. 1996. Photogrammetrie. Verfeinerte Methoden und Anwendungen. 3. Auflage. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn. 488 S.
- Kraus, K. 1997. Photogrammetrie. Grundlagen und Standardverfahren. 6. Auflage. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn. 394 S.
- Niem, W. 1994. Robust And Fast Modelling of 3D Natural Objects From Multiple Views“. *SPIE Proceedings „Image And Video Processing II“* Vol. 2182, San Jose, 388–397.
- Niem, W. 1999. Automatische Rekonstruktion starrer dreidimensionaler Objekte aus Kamerabildern. Dissertation Fachbereich Elektrotechnik u. Informationstechnik Univ. Hannover. 126 S.
- Pratsch, S. 1991. Anwendungsmöglichkeiten des fotografischen Systems Elcovision 10 im forstlichen Meß- und Versuchswesen. Diplomarbeit Forstwiss. Fakultät Univ. München. 105 S.
- Prusinkiewicz, P.; Room, P.M.; Hanan, J.S. 1996. Virtual Plants – New Perspectives for Ecologists, Pathologists and Agricultural Scientists. *Trends in Plant Science* 1, 33–38.
- Reidelstürz, P. 1997. Forstliches Anwendungspotential der terrestrisch-analytischen Stereophotogrammetrie. Dissertation Forstwiss. Fakultät Univ. Freiburg. 256 S. + Anhang.
- Room, P.M.; Maillette, L.; Hanan, J.S. 1994. Module and Metamer Dynamics And Virtual Plants. In: *Advances In Ecological Research* 25/1994. Harcourt Brace & Co. Publishers Academic Press, London, 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, 265–270.
- Weber, J. 1900. Die Photographie im Dienste der Forstwissenschaft. *Allg. Forst- u. Jagdzeitschrift*, 301–308.
- Weber, J. 1902. Holzmassenermittlung am stehenden Stamm aufgrund photographischer Aufnahmen. Dissertation, Gießen. 37 S.

# Biegemechanische Eigenschaften von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) bei unterschiedlichen Wuchsbedingungen – Grundlagen zur Abschätzung der Stabilität von Bäumen gegenüber mechanischen Belastungen durch Sturm und Schnee

F. Brüchert und G. Becker

Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Werderring 6, D-79085 Freiburg

**Kurzfassung:** Die mechanische Stabilität von Einzelbäumen und in der Summe die Stabilität von Beständen werden durch die äußere Gestalt (Größe, Form) und die inneren Materialeigenschaften (Festigkeit, Elastizität) aller oberirdischen und unterirdischen Organe des Baumes (Stamm, Krone, Wurzeln) determiniert. Die Ausprägung dieser äußeren und inneren Merkmale des Einzelbaumes ist abhängig von seiner genetischen Disposition, den jeweiligen Standortsbedingungen und der waldbaulichen Behandlung des Bestandes. Die vorliegende Arbeit beschreibt in ihrem ersten Teil die physikalischen Grundlagen der Baummechanik bezüglich der Belastung durch Wind/Sturm (Biegebelastung) und Schnee (Druckbelastung). Im zweiten Teil wird die Variabilität der äußeren und inneren Merkmale von Stamm, Krone und Wurzeln bezüglich ihrer Bedeutung für die mechanische Stabilität gegenüber diesen beiden Belastungsarten diskutiert. Der Einfluss der waldbaulichen Behandlung auf die Entwicklung des Stammes und der Krone findet hierbei besondere Berücksichtigung.

## The mechanical properties of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) under varying growth conditions – the basics of biomechanics to assess tree stability against wind and snow damage

**Abstract:** The mechanical stability of the tree and in total of a stand is determined by the form (size and shape) and the internal properties (strength and elasticity) of crown, stem and root system of the individual tree. The development of the external and internal features of the individual tree depends on its genetics, the site conditions and the silvicultural treatment of the stand. In its first part the paper presents the fundamentals of tree mechanics with respect to the different type of load by wind (bending) and snow or ice (compression). The second part of the paper deals with the variation of the external and internal characteristics of stem, crown and root system and its effect on the mechanical stability of the tree.

**Key words:** stability, Norway spruce, mechanical properties, growth, risk assessment, *Picea abies* (L.) Karst.

## 1 Einleitung

Die mechanische Festigkeit von Holz ist aus forstwissenschaftlicher Sicht in mehrfacher Sicht von theoretischem wie auch von praktischem Interesse: Für waldbauliche Überlegungen ist die Stabilität von Einzelbäumen und von Waldbeständen entscheidend, wenn es um die viele Jahrzehnte umfassende Planung und Steuerung der forstlichen Produktion geht. Produktions- und Verjüngungsziele hängen maßgeblich davon ab, dass die Bäume ihre vorgesehene Lebensdauer auch sicher erreichen und nicht zuvor durch Sturmwurf oder -bruch oder auch durch Schnee- oder Eisbruch frühzeitig ausfallen und damit nicht nur wirtschaftliche Verluste hervorrufen, sondern auch zusätzliche Instabilität in das Nutz-Öko-System Wald bringen. Nachdem durch Maßnahmen der Standraumgestaltung im Laufe des Bestandeslebens in sehr weitgehendem Maße Einfluss sowohl auf die Baumarchitektur wie auch auf die innere Holzstruktur genommen werden kann, werden waldbauliche Steuerungsmaßnahmen zunehmend nach ihrer vermuteten stabilitätsfördernden Wirkung konzipiert (Abetz 1976; Kenk 1988). Aus Sicht der Holzverwertung und -verwendung ist die Festigkeit des Roh- und Werkstoffes Holz, der sich etwa in Form von Schnittholz (Balken oder Bretter) durch Konversion aus dem gewachsenen Stamm herstellen lässt, von entscheidender Bedeutung für seine Einsatzmöglichkeiten etwa im Baubereich.

Das grundlegende Problem besteht nun darin, dass nach allgemeiner forstpraktisch-waldbaulicher Überzeugung Bäume mit einer relativ großen axialen Durchmesserabnahme in

Verbindung mit einer gut ausgeprägten, tief ansetzenden Krone als mechanisch besonders stabil gelten (Abetz u. Unfried 1984; c. f. Rottmann 1986; Kellomäki u. Peltola 1998). Unter Verwertungsgesichtspunkten sind derart geformte Bäume jedoch von deutlich geringerem Nutzen, da diese sog. „Abholzigkeit“ deutliche Ausbeuteeinbußen bei der Konversion von Rundholz zu Schnittholz zur Folge hat und da weiterhin zahlreiche und große Äste – wie sie mit wohlentwickelten Kronen in der Regel verbunden sind – die Festigkeitseigenschaften des Holzes (Grammel 1990; Sauter u. Fahrbach 1993), aber auch in vielen Verwendungsbereichen seine optische Qualität deutlich in negativer Richtung beeinflussen.

Einzelbaum-stabilitätsorientierter Waldbau gerät also in wachsendem Maße in Konflikt mit wertschöpfungsorientierter Holzverwertung und -verwendung. Vor diesem Hintergrund liegt es nahe, die Allgemeingültigkeit der Thesen von der größeren Stabilität abholziger Bäume und von der Beeinflussbarkeit der Baumformen durch entsprechende Standraumgestaltung zu prüfen und dadurch mögliche Hinweise zur Überwindung des skizzierten Dilemmas zu geben.

Der vorliegende Beitrag wird im Folgenden die allgemeinen mechanischen Grundlagen und die einzelnen Kriterien der Einzelbaum- und der Bestandesstabilität – die mechanischen Eigenschaften des Stammes, die Ausprägung der Krone, die Verwurzelung sowie die Wirkung der Bestandesstruktur – zusammenfassend darstellen und ihre Bedeutung hinsichtlich der Stabilität diskutieren.