

# Beitrag des terrestrischen Laserscannings zur Erfassung der Struktur von Baumkronen

Hans Pretzsch    Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München (DE)\*  
Stefan Seifert    Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München (DE)  
Peng Huang    Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München (DE)

## Application of terrestrial laser scanning for measuring tree crown structures

This paper addresses the potential of terrestrial laser scanning (TLS) for describing and modelling of tree crown structure and dynamics. We first present a general approach for the metabolic and structural scaling of tree crowns. Out of this approach we emphasize those normalization and scaling parameters which become accessible by TLS. For example we show how the individual tree leaf area index, convex hull, and its space-filling by leaves can be extracted out of laser scan data. This contributes to a theoretical and empirical substantiation of crown structure models which were missing so far for e.g. quantification of structural and species diversity in forest stands, inventory of crown biomass, species detection by remote sensing, and understanding of self- and alien-thinning in pure and mixed stands. Up to now works on this topic delivered a rather scattered empirical knowledge mainly by single inventories of trees and stands. In contrast, we recommend to start with a model approach, and to complete existing data with repeated TLS inventories in order to come to a consistent and theoretically based model of tree crowns.

**Keywords:** crown allometry, crown structure, leaf area, fractal space filling, fractal dimension, Euclidian geometric scaling, terrestrial laser scanning

**doi:** 10.3188.szf.2011.0186

\* Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, DE-85354 Freising, E-Mail H.Pretzsch@lrz.tum.de

Wissen über die Struktur und die Strukturentwicklung von Baumkronen hat eine grosse praktische und wissenschaftliche Relevanz. Indem Baumkronen den Lebensraum vieler Tier- und Pflanzenarten prägen, werden sie zu wichtigen Systemkomponenten von Waldbeständen und zu Indikatoren der Biodiversität in Wäldern (Müller & Brandl 2009). Bei der Waldzustandserfassung dient die Krone der Bioindikation, indem von der Kronenstruktur auf den Vitalitätszustand des Baumes geschlossen wird (Roloff 2001). Da die Kronenausdehnung die Ressourcennutzung und den Konkurrenzeffekt von Bäumen auf ihre Nachbarn repräsentiert, dienen Kronenvolumen, Kronenquerschnittsfläche, Kronenoberfläche und Blattfläche der Quantifizierung von Standraumansprüchen der Baumarten, der Bestimmung von Mischungsanteilen und der Ermittlung von Standraumnutzungseffizienzen (Pretzsch 2010). Die artspezifische Kronenform und -expansion bestimmen die Struktur- und Dynamik von Beständen, die Geschwindigkeit des Kronenschlusses nach Durchforstungen oder ungeplanter Öffnung des Kronendachs und die Mortali-

tät infolge von Selbstausdünnung (Assmann 1961, Zeide 1985). Wissen und Modellvorstellungen zur artspezifischen Kronenstruktur dienen weiter der Visualisierung und Analyse der Walddynamik (Seifert 2006, 2010). So gesehen kann von der Kronenallometrie auf die Bestandesdynamik und die Landschaftsebene skaliert werden (Enquist et al 1998, 2009). Schliesslich sind Modelle über Struktur und Dynamik von Baumkronen Voraussetzung für eine fernerkundliche Arterkennung (Rahman & Gorte 2009).

Angesichts der wissenschaftlichen und praktischen Relevanz ist es erstaunlich, wie gross die Wissenslücken über die artspezifische Struktur und Struktur- und Dynamik von Baumkronen noch immer ist. Seit Jahren wird beispielsweise kontrovers diskutiert, anhand welcher Modelle sich die Kronenform und die Kronenformentwicklung fassen lassen (z.B. euklidische geometrische Modelle: Yoda et al 1963, Weller 1987; fraktale Modelle: West et al 1997, 2009, Zeide 1987, 1998).

Der entscheidende Grund für das Wissensdefizit liegt in der bislang kaum messbaren ontoge-



**Abb 1** Die Längen- und Breitenausdehnung von Spross und Wurzel sowie das Muster der Ausfüllung des Kronen- und Wurzelraumes sind schwer zu erfassende, aber wichtige art-spezifische und physiologische Eigenschaften.

netischen Entwicklung von Baumkronen, d.h. ihrer individuellen Formentfaltung während des Pflanzenlebens. Die Erfassung der Strukturentfaltung und die Entwicklung von Modellen erfordern die wiederholte Messung von Kronenausdehnung, Blattfläche, Kronenansatzhöhe, Blattflächendichte und weiteren Kenngrößen. Das wird bei Bäumen zum einen durch ihre Grösse erschwert. Zum anderen erfordert die Langlebigkeit eine wiederholte Messung der genannten Größen an ausgewählten Individuen, denn nur so können echte Zeitreihen gewonnen werden. Die räumliche und zeitliche Dimension des Baumwachstums stand deshalb bisher der systematischen Erfassung von grösseren Stichproben entgegen. Beispielfhaft sei hier die Untersuchung von Droste Hülshoff (1969) angeführt, der insgesamt fünf Fichten erntete, um die Blattfläche sowie die Stamm- und Zweigoberfläche möglichst präzise zu erfassen. Damit konnte er – mit erheblichem Zeitaufwand – äusserst wertvolle Zustandsdaten gewinnen. Allerdings verunmöglicht

die zerstörende Vollernte die für die Beschreibung der Struktur- und Dynamik notwendigen Folgeaufnahmen. Bislang blieb damit nur der Weg der künstlichen Zeitreihe, bei dem von einmalig vermessenen, räumlich benachbarten Individuen auf deren zeitliche Entwicklung geschlossen wird. Ein solcher Ersatz fehlender dynamischer Strukturanalysen durch inter-individuelle Analysen kann aber mit erheblichen Fehlern behaftet sein (Pretzsch 2009, 2010).

Demgegenüber ebnet das terrestrische Laserscanning (TLS) den Weg für zerstörungsfreie und damit wiederholende Aufnahmen von Bäumen oder Baumorganen. TLS bezeichnet die Vermessung von Objekten mithilfe eines Laserscanners vom Boden aus. Dabei werden Laserimpulse in definierten Richtungen ausgesendet und die Entfernung des Auftreffpunkts gemessen. Das Resultat des Scanvorgangs ist eine dreidimensionale Punktwolke, die die Objekte in der Scannerumgebung widerspiegelt. Die Messgeschwindigkeit ist dabei sehr hoch (bis zu 250 000 Messungen pro Sekunde), was eine sehr feine Abtastung der Objekte erlaubt. Da der Laser feste Stoffe normalerweise nicht durchdringen kann, entsteht hinter den Objekten ein Schatten, in dem keine Messungen existieren. Bei Nadelbäumen dringt der Laser je nach Scannertyp beispielsweise nur 5 bis 6 m in die Krone ein. Um die Schatten zu verringern und damit auch die Baumkronen der zu untersuchenden Bäume optimal vermessen zu können, erfolgen die Messungen nicht nur von einem Aufstellpunkt, sondern von mehreren, möglichst gut verteilten Punkten aus. Die Messungen aller Aufstellpunkte werden zu einer Punktwolke in einem gemeinsamen Koordinatensystem zusammengefügt.

Auf diese Weise kann die Formentfaltung aus echten Zeitreihen erschlossen werden. Auch kann aus den Momentaufnahmen das Raumfüllungsmuster im Kronen- und Wurzelraum, wie es Abbildung 1 für eine Traubeneiche zeigt, bestimmt werden. Im Folgenden interessieren uns die Variablen Blattfläche, Kronenvolumen und Baumoberfläche von Einzelbäumen. Diese tragen zum Verständnis und zur modellhaften Abbildung der Muster bei, nach denen der Kronen- beziehungsweise der Wurzelraum von Waldbeständen mit Organen (Blätter, Nadeln, Zweige, Äste, Knospen, Wurzeln) ausgefüllt ist (Abbildung 2). Diese Variablen waren bisher kaum zugänglich und damit für die Entwicklung und Parametrisierung allgemeiner Modellvorstellungen nicht oder nur in unzureichender Form verfügbar.

Der vorliegende Aufsatz vermittelt 1) Theorien zur Form und Formentwicklung von Baumkronen, 2) Einblicke in die Methode und den potenziellen Nutzen des terrestrischen Laserscannings (TLS) für die Baumkronenvermessung und 3) Einblick in laufende Arbeiten, bei denen TLS Strukturinformationen erbringt, die mit bisherigen Messmethoden kaum zugänglich waren.

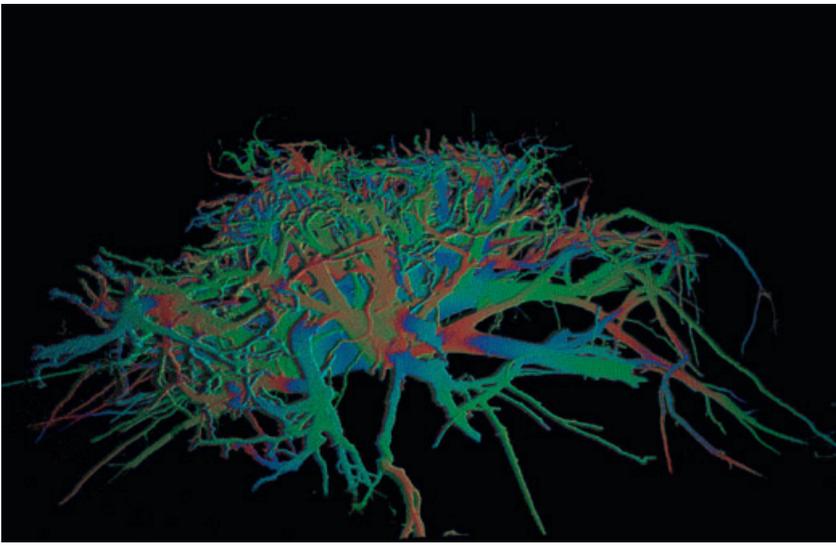


Abb 2 Wurzeln einer 70-jährigen Fichte, erfasst und vermessen mit einem Riegl-LMS-Z360i-Laserscanner in Winkelschritten von 0.12 Grad.

## Theorien zur Form und Formentwicklung von Baumkronen

Gängige Modelle der Kronenformentwicklung gründen entweder auf physiologischen Prozessvorstellungen oder morphologischen Strukturannahmen. Diese Ansätze werden im Folgenden skizziert und zusammengeführt.

Aufgrund der fraktalen Packung der Leitungsbahnen im Bauminneren gelangen West et al (1997) zum Zusammenhang  $la \propto v^{3/4}$  zwischen Blattfläche  $la$  und oberirdischem Baumvolumen  $v$ , der allgemein unter dem Begriff der metabolischen Skalierung oder « $3/4$  power scaling» bekannt ist. Als Baumvolumen bezeichnen wir in diesem Zusammenhang das gesamte oberirdische Volumen von Stamm, Ästen, Zweigen, Blättern und Früchten. Unter der Annahme, dass die genannten Organe eine ähnliche Raumdichte besitzen, ist das Baumvolumen proportional zur oberirdischen Biomasse ( $v \propto m$ ). Wird die Proportionalität zwischen Blattfläche und Baumvolumen zu einer allometrischen Beziehung erweitert, gelangt man zur Beziehung  $la = a \times v^{\alpha_{la,v}}$ , in der  $a$  den Normierungsfaktor für die Blattfläche und  $\alpha_{la,v}$  den Anstieg der Blattfläche mit der Grössenzunahme repräsentiert. West et al (2009) gehen davon aus, dass  $\alpha_{la,v} = 3/4$  artübergreifend gilt und lediglich der Faktor  $a$  artabhängig ist. Durch TLS-Wiederholungsaufnahmen an denselben Individuen lassen sich  $la$  und  $v$  zu verschiedenen Zeitpunkten erfassen und  $a$  und  $\alpha_{la,v}$  regressionsanalytisch herleiten.

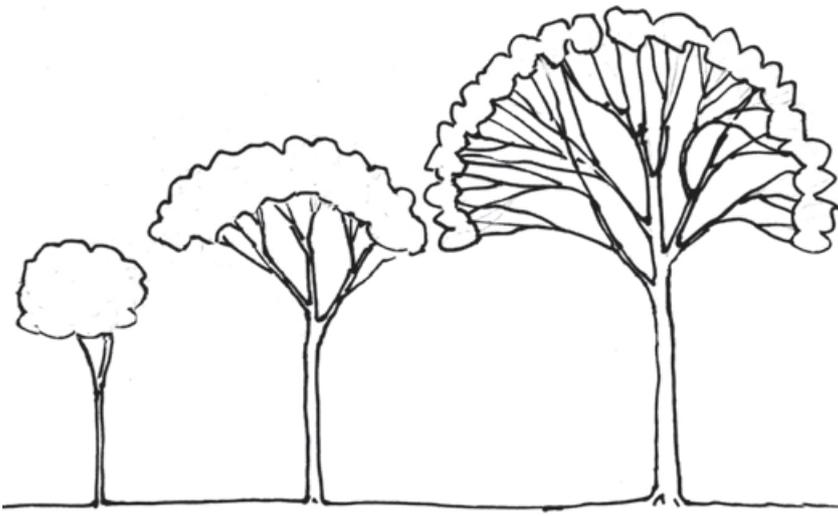
Während diese physiologische Annäherung den Zusammenhang zwischen Baumvolumen und Blattmasse in den Mittelpunkt stellt, fragt die strukturelle Annäherung danach, wie die Blattmasse im Raum angeordnet ist. Insbesondere interessieren Oberfläche und Volumen der Hülle der Baumkrone, die Länge und Breite des Kronenraumes, die Ausfü-

lung des Kronenraums mit Blattfläche und die Veränderung der Raumaufüllung mit zunehmender Kronengrösse. Ordnet ein Baum seine Blätter schirmförmig an der oberen äusseren Kronenperipherie an, so besetzt und beschirmt er eine grössere Einflusszone als sein Nachbar, der dieselbe Blattfläche geklumpt, nahe der Stammachse anordnet. Es gibt viele Ansätze, die die Blattverteilung auf Bauebene nachzubilden versuchen (Grote & Pretzsch 2002, Disney et al 2006), jedoch basieren diese immer auf Modellannahmen oder empirischen Verzweigungsmustern und stossen daher an ihre Grenzen, wenn es um eine detaillierte Beschreibung der Blattflächenverteilung geht, wie sie beispielsweise für das Verständnis von Mischbeständen nötig ist.

Unterstellen wir für den Körper, der durch die konvexe Hülle der Baumkrone aufgespannt wird und eine Längenausdehnung von  $l$  in einer Richtung besitzt, die Regeln der euklidischen Geometrie. Dann gilt für die Kronenquerschnittfläche ( $csa$ )  $csa \propto l^2$  und für die Blattfläche ( $la$ ) innerhalb des Körpers  $la \propto l^n$ , mit  $n=2-3$ , je nachdem, ob die Blätter an der Oberfläche der Hülle angeordnet sind ( $n=2$ ) oder in fraktalem Muster den Innenraum ausfüllen ( $n=3$ ). Aus der biologischen Anschauung sind beide Extreme bekannt (Abbildung 3), aber auch Strukturausprägungen, die dazwischen liegen (Oldemann 1990, Roloff 2001). Aus  $csa \propto l^2$  und  $la \propto l^n$  resultiert als verallgemeinbarer Zusammenhang  $csa \propto la^{2/n}$  zwischen Kronenquerschnittfläche und Blattfläche oder als vollständige allometrische Gleichung  $csa = b \times la^{2/n}$ . Wieder gilt, dass der artspezifische Normierungsfaktor  $b$  und die fraktale Dimension  $n$  in der Vergangenheit indirekt bestimmt wurden, sie via TLS aber nun direkt messtechnisch zugänglich werden.

## Populationsdynamische Konsequenzen am Beispiel der Selbstausdünnung

Für den einzelnen Baum beschreiben die allometrischen Beziehungen, wie sein Grössenzuwachs vom Angebot an Ressourcen oder Wuchsraum abhängt. Auf der Ebene des Bestandes beschreiben sie, welcher Ressourcen- beziehungsweise Standflächenbedarf für das Überleben und Wachstum des Mittelstamms erforderlich ist und damit grundsätzliche Zusammenhänge der Populationsdynamik. Verschiedene Ansätze zur Skalierung von der Einzelbaum- auf die Bestandesebene zielen auf eine Verbindung zwischen Baumphysiologie und Populationsökologie. Enquist et al (1998, 2009) übertragen die Theorie der metabolischen Skalierung, welche für den Zusammenhang zwischen Blattfläche ( $la$ ) und Pflanzenmasse ( $m$ )  $la \propto m^{3/4}$  vorhersagt, auf die Bestandesebene. Sie gehen dabei von einem konstanten Ressourcenangebot ( $R$ ), einer konstanten Blattfläche auf Bestandesebene ( $LA$ ) und einer Anzahl Bäume ( $N$ )



**Abb 3** Die unterschiedlichen Prinzipien der Raumbefüllung: Beim einen Extrem (links) wird der ganze Kronenraum ausgefüllt, beim anderen (rechts) befinden sich die Blätter nur auf der Aussenhaut der Krone.

pro Hektar aus. Weil  $LA = N \times \bar{la}$ ,  $R = N \times \bar{r}$  und  $\bar{la} \propto \bar{r}$ , gelangen sie zu  $\bar{la} \propto \bar{m}^{3/4}$  und weil weiter  $N \propto \bar{la}^{-1}$  gilt, ergibt sich  $\bar{m} \propto N^{-4/3}$ , was gleichbedeutend ist mit einer allgemeingültigen Selbstausdünnungslinie mit der Steigung  $\alpha_{m,N} = -4/3$ . Damit übertragen sie das Prinzip der metabolischen Skalierung aufgrund der fraktalen inneren Leitungsbahnenstruktur in Pflanzen auf die Prozesse auf Bestandesebene.

Wird aber berücksichtigt, dass eine gegebene Blattfläche je nach räumlicher Anordnung (Dimension  $n=2-3$ ) unterschiedliche Kronenquerschnittsflächen ( $c_{sa}$ ) erbringen kann, dann reicht die Selbstausdünnungslinie je nach Muster der Raumbefüllung von  $-3/4$  (bei  $n=2$ ) bis  $-1/2$  (bei  $n=3$ ) wegen  $N \propto v^{-3/4 \times 2/n}$ . Das bedeutet für die Selbstausdünnungslinie  $N \propto v^{-3/4}$  bis  $N \propto v^{-1/2}$  beziehungsweise  $v \propto N^{-4/3}$  (für  $n=2$ ) bis  $v \propto N^{-2}$  (für  $n=3$ ). Dieser theoretisch abgeleitete Rahmen für den Steigungsparameter  $\alpha_{v,N}$  stimmt gut mit empirisch gefundenen Werten zwischen  $-1.3$  und  $-2.0$  überein (Osawa 1995, Pretzsch 2006, Weller 1987, Zeide 1985). Mithilfe von TLS kann er noch weiter präzisiert werden. Korrekte, artspezifische Allometrieparameter sind unter anderem die Voraussetzung für die Schätzung und Modellierung maximaler Bestandesdichten, die Abbildung von Mortalitätsprozessen bei Überschreitung maximaler Dichten sowie die Ableitung von waldbaulichen Behandlungsrichtlinien und deren praxisnahe Ausformulierung in Bestandesdichtediagrammen (Bégin et al 2001).

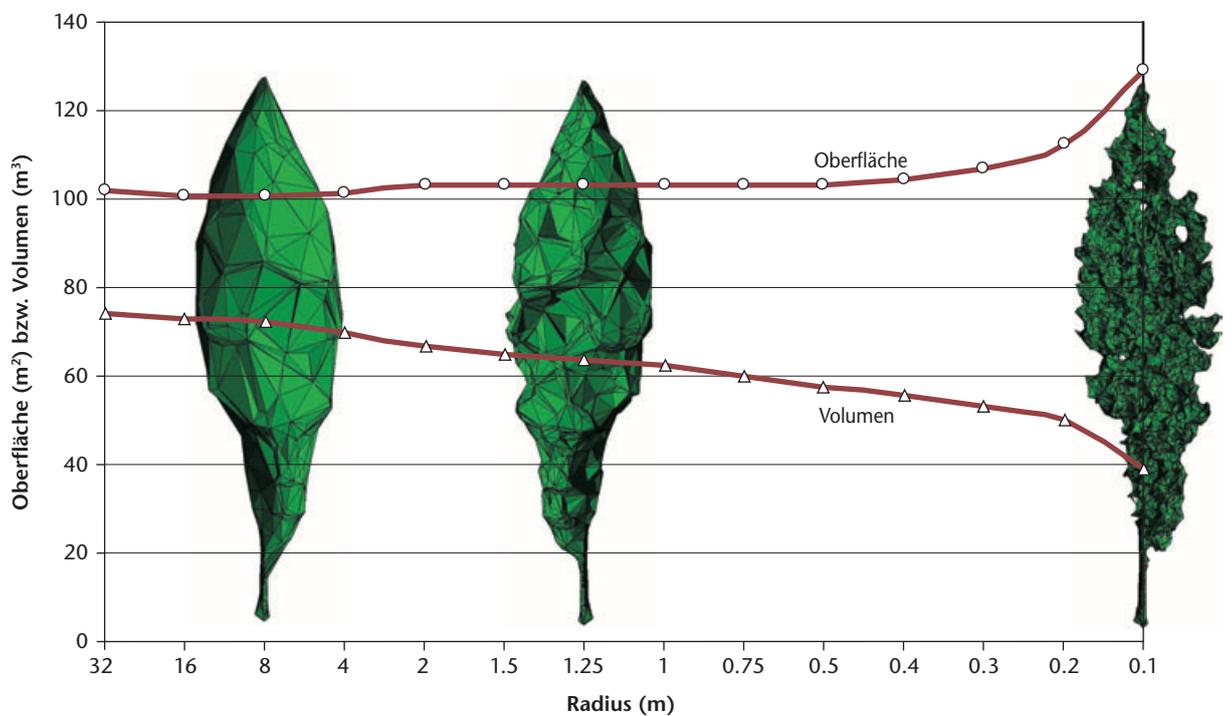
In Reinbeständen konkurrieren die Individuen, abgesehen von gewisser genetischer Variation, mit ähnlichen Strategien um Raumbesetzung und Ressourcen. Demgegenüber kann es in Mischbeständen zu starker funktioneller Differenzierung in der Raumbesetzung und Kronenstruktur kommen; zum Beispiel kann die Buche im Fichten-Buchen-Mischbestand ihren Schattenhabitus mit schirmartiger ( $n=2$ ) Raumbesetzung ausspielen und mit relativ we-

nig Biomasse viel Raum besetzen, während sich die Fichte dominant, schmal und kompakt entwickelt ( $n=3$ ). Infolgedessen wird das strukturelle Spektrum in Mischbeständen grösser, die Bestandesdichte kann steigen, und die Ausdünnungsmuster im Mischbestand unterscheiden sich von denjenigen in Reinbeständen. So haben jene Arten (z.B. die Buche), die in Reinbeständen höchste Konkurrenz und geringste Selbsttoleranz entwickeln, den grössten Nutzen von der Mischung. Während sie im Reinbestand die grösste Selbstausdünnung zeigen, kann sich ihre Konkurrenz im Mischbestand primär gegen die Mischbaumart richten (Zeide 1985).

## Anwendung von TLS für die Beschreibung der Kronenstrukturdynamik

### Kronenhülle

Die Kronenhülle ist eine Grösse, die vor allem von Wachstumsmodellen benutzt wird. Sie hat einen signifikanten statistischen Einfluss auf das Baumwachstum (Pretzsch et al 2002). Daher sind schon früh Modelle zur Kronenbeschreibung entwickelt worden (Cescatti 1997). Bisher waren nur wenige Kronendaten mit beschränkter Genauigkeit verfügbar. Mithilfe von TLS ergibt sich nun die Möglichkeit, die Kronenhülle in nahezu beliebiger Auflösung zu beschreiben. Eine Methode ist die Berechnung der konvexen Hülle auf der Datengrundlage von allen via TLS erfassten Punkte einer Krone. Dabei werden die Punkte über Dreiecksflächen verbunden. So bleiben alle extremen Ausdehnungswerte der Krone erhalten, die Einbuchtungen zwischen den Ästen verschwinden allerdings. Die konvexe Hülle kann auch mit sogenannten Alpha-Shapes (Edelsbrunner et al 1983) ermittelt werden. Dabei werden Punkte, die zur Oberfläche gehören, durch das Anpassen von Kugeln gefunden, wobei immer drei Punkte auf der Kugeloberfläche und alle anderen Punkte ausserhalb der Kugel liegen müssen. Die Punkte auf der Kugeloberfläche werden durch ein Oberflächendreieck verbunden. Für einen unendlichen Kugelradius entspricht die Alpha-Shape der konvexen Hülle. Je kleiner der Radius gewählt wird, desto enger umschliesst die Alpha-Shape die Krone und desto mehr Details der Krone bleiben erhalten. Mit abnehmendem Radius erhöht sich damit die Oberfläche der Alpha-Shape und das umschlossene Kronenvolumen nimmt ab. Solange der Kugeldurchmesser grösser als der Punktabstand der TLS-Messung ist, kann durch Variation des Radius die fraktale Dimension der Krone abgeschätzt werden. Abbildung 4 gibt exemplarisch den Verlauf von Oberfläche und Volumen in Abhängigkeit zum Rekonstruktionsradius  $\alpha$  für eine Fichtenkrone an. Das mit kleineren  $\alpha$ -Werten sinkende Kronenvolumen gibt den reinen Raumbedarf der Krone besser wieder als die normalerweise verwen-



**Abb 4** Das Volumen und die Oberfläche verändern sich je nach verwendetem Rekonstruktionsradius  $\alpha$  der Alpha-Shapes. Mit kleiner werdendem Radius bleiben mehr Details der Krone erhalten, das Volumen nimmt ab und die Oberfläche nimmt zu.

dete konvexe Hülle. Da es aber bisher zu wenige Untersuchungen über die optimale Wahl von  $\alpha$  gibt, wird in diesem Artikel weiterhin das Volumen der konvexen Hülle als Kronenvolumen verwendet. Neben der einfachen und präzisen Beschreibung von Oberfläche und Volumen erlaubt das Verfahren auch die Abschätzung der Oberflächenrauigkeit der Krone, indem man die Oberfläche mit dem zugehörigen Kronenvolumen oder der Fläche der Hülle vergleicht. Damit die Anpassung der Hüllen funktioniert, mussten allerdings bisher die Punktwolken aus den TLS-Messungen für den jeweiligen Baum von Hand von den Nachbarbäumen separiert werden.

### Blattfläche

Als ein aktiv messendes, optisches System kann ein Laserscanner direkt die Entfernung zu einem Objekt messen. Dies erlaubt eine neue Herangehensweise zur Bestimmung der Blattfläche. Zum Beispiel ermittelten Clawges et al (2007) die Blattfläche von Lärchen durch einen Vergleich der Dichte der Lasermesspunkte in belaubtem und unbelaubtem Zustand. Hosoi & Omasa (2007) bestimmten das vertikale Blattflächenprofil durch einen Voxel-Ansatz, indem sie besetzte, unbesetzte und nicht erfasste Bereiche quantifizierten. Mit modernen terrestrischen Laserscannern kann insbesondere der Lückenanteil gut erfasst werden (Lovell et al 2003, Henning & Radtke 2006).

Zur Untersuchung der Relation zwischen Blattfläche und Kronenvolumen auf Einzelbaumniveau wurde für Fichte (*Picea abies*) ein neues TLS-basierendes Verfahren entwickelt (Huang & Pretzsch 2010).

Die Methode stützt sich auf die Theorie der bisherigen passiv-optischen Bestimmung des Blattflächenindex (LAI), erweitert diese aber zum Einsatz in einem dreidimensionalen Umfeld. Die Grundidee dabei ist, für jeden Baum aus einem einzelnen Scan den Lückenanteil zu bestimmen und aus weiteren Scans die Kronenausdehnung abzuleiten (Abbildung 5). Durch die Verknüpfung beider Attribute wird sowohl die lokale Blattflächendichte (LAD) als auch das Volumen des zugehörigen Raumteils bestimmt. Die Blattfläche (LA) der einzelnen Raumteile ist das Produkt aus dem Volumenteil und der LAD. Durch Summation über alle Volumenteile ergibt sich die Blattfläche des Gesamtbaums. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse von elf ausgewerteten Bäumen zusammengefasst. Die Messentfernung zum Baum wurde hier so gewählt, dass die gesamte Krone möglichst von der Seite erfasst wird. Die Segmentgröße wurde möglichst klein gehalten, sie muss aber genügend

|            | Blattfläche |              |
|------------|-------------|--------------|
|            | TLS         | allometrisch |
| Minimum    | 8.09        | 18.93        |
| 1. Quartil | 27.2        | 29.82        |
| Mittelwert | 48.34       | 58.74        |
| 3. Quartil | 69.95       | 81.34        |
| Maximum    | 94.43       | 118.86       |

**Tab 1** Übersicht über die aus TLS-Daten und die mithilfe von allometrischen Funktionen ermittelten Blattflächen von elf Fichten (Brusthöhendurchmesser: Mittelwert: 22.2 cm, Minimum: 14.7 cm, Maximum: 30.2 cm; Baumhöhe: Mittelwert: 20.2 m, Minimum: 17.5 m, Maximum: 23.5 m).

Messwerte enthalten. In dieser Auswertung war eine Segmentgrösse von ca.  $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$  optimal. Zwischen den allometrischen und den mithilfe des vorgestellten Verfahrens hergeleiteten Werten besteht die Beziehung  $LA_{\text{allometrisch}} = 1.102 \times LA_{\text{Laser}} + 5.487$  ( $R^2$  0.81). In dem untersuchten Kollektiv fällt die mittels TLS ermittelte Blattfläche um mehr als 10% geringer aus als durch allometrische Zusammenhänge erwartet. Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden zur Blattflächenbestimmung, zum Beispiel per Fischaugenkamera, hat TLS den Vorteil, dass Aussagen auf Baumebene und nicht nur für Baumgruppen oder auf Bestandesebene möglich sind.

### Blattbiomasseverteilung in der Krone

Wie Leeuwen & Niewenhuis (2010) aufzeigen, war es bisher kaum möglich, die Verteilung der Biomasse beziehungsweise die Ast-/Blattverteilung in einer Baumkrone mit genügend hoher Genauigkeit zu erfassen. Eine Möglichkeit, die Verteilungsstruktur aus TLS-Daten zu erhalten, ist deren Ableitung aus der Raumbesetzungsdichte. Da die Laserstrahlen die getroffenen Objekte normalerweise nicht durchdringen, kommen mit zunehmender Entfernung immer weniger reflektierte Laserimpulse pro Raumeinheit (Voxel) zum Scanner zurück. Die reine Trefferanzahl  $H$  pro Raumeinheit sagt damit nur in groben Zügen etwas über die echte Besetzungsdichte aus und muss korrigiert werden, um zu einer spezifischen Besetzungsdichte zu werden. Die hier vorgestellte Methode lehnt sich an das Vorgehen von Durrieu et al (2008) an. Ausgehend von einer Scanposition wird der Raum in einem sphärischen Koordinatensystem in diskrete SVoxel unterteilt. SVoxel

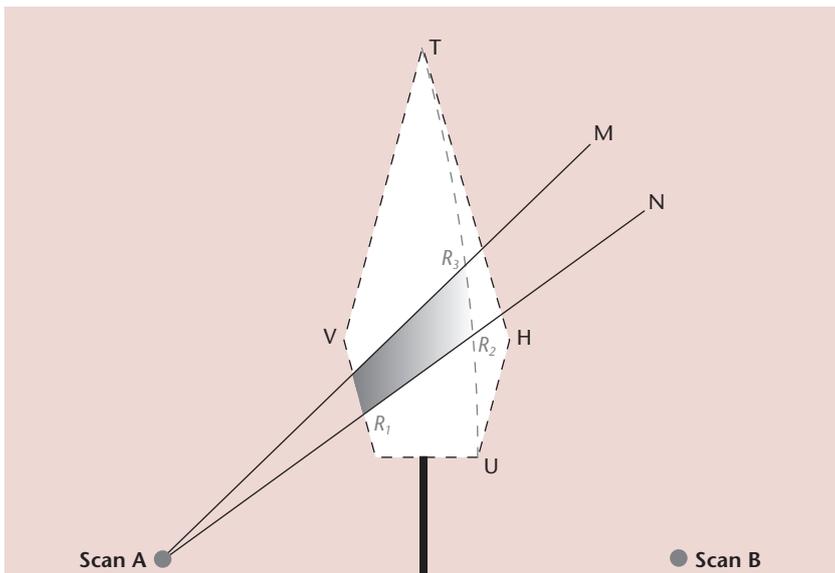
sind analog zu Voxel kleine Raumelemente, die vier ebene und zwei sphärische Begrenzungsflächen haben. Für jedes SVoxel wird zunächst die Anzahl  $N$  der tatsächlich das SVoxel durchdringenden Laserstrahlen berechnet. Normiert man nun die Trefferzahl  $H$  im SVoxel, also die Zahl der Laserstrahlen, die im SVoxel ein Objekt getroffen haben mit  $N$ , ergibt sich eine relative Besetzungsdichte  $D_s$  im SVoxel. Da die SVoxel unterschiedliche Volumen haben, muss die relative Besetzungsdichte  $D_s$  mit dem korrespondierenden SVoxel-Volumen entzerrt werden, um die gewünschte spezifische Besetzungsdichte  $D = D_s/V = H/N/V$  zu erhalten (Abbildung 6).

Durch Zusammenfassen mehrerer so erstellter Besetzungsdichten aus unterschiedlichen Scanpositionen kann auf die Dichteverteilung der Objekte in der Baumkrone und damit auch auf die Blattbeziehungsweise Feinstastverteilung geschlossen werden. Durch mehrere Messreihen kann dann schliesslich die Raumausfüllungsstrategie für die einzelnen Arten bestimmt werden.

## Diskussion

### Relevanz des terrestrischen Laserscannings für die Modell- und Theoriebildung

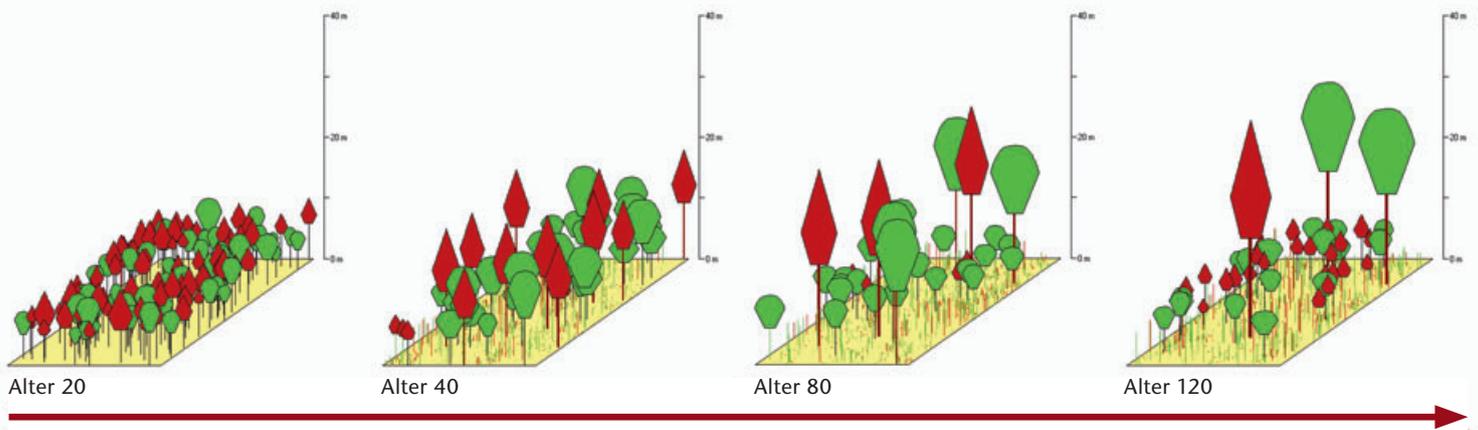
Die angeführten Beispiele zeigen, welches Potenzial TLS für die empirische Forschung, aber insbesondere für die Modell- und Theoriebildung birgt. Fortentwickelte Wachstumsmodelle für Waldbestände bilden den Regelkreis Baumwachstum  $\rightarrow$  Bestandesstruktur  $\rightarrow$  individuelle Wuchskonstellation  $\rightarrow$  Baumwachstum ab und nutzen Oberfläche, Inhalt und



**Abb 5** Blattflächenschätzung mittels terrestrischem Laserscanning. Der Baum wird aus zwei gegenüberliegenden Positionen A und B aufgenommen. Die graue Linie zwischen T–U entspricht der Eindringtiefe des Lasers in die Baumkrone beziehungsweise den Punkten, die von Position A aus am weitesten entfernt gemessen wurden. Der Lückenanteil wird nur bis zur Entfernung  $R_2$  bestimmt und ist bei geeigneter Wahl von  $R_2$  eng mit dem Blattflächenindex (LAI) korreliert. Die lokale Blattfläche (LA) wird dann über  $LA = LAI/(R_2 - R_1)$  bestimmt.



**Abb 6** Ein horizontaler Schnitt durch die Dichteverteilung in einer Fichtenkrone bei etwa 50% der Kronenlänge. Die Bereiche über einem Schwellenwert von 10% der Maximaldichte werden durch die Punkte wiedergegeben. Je heller der Punkt, desto dichter ist der zugehörige Raumbereich. Die Grafik beruht nur auf einem einzigen Scan. Die Stammachse ist durch den roten Punkt markiert.



Ausgangsstruktur

Abb 7 Nutzung von dynamischen Kronenstrukturmodellen für die Simulation und Visualisierung der Baum- und Bestandesdynamik.

Länge der Krone oder die Blattfläche für die Vorhersage der Entwicklung eines Baumes und seiner Konkurrenzwirkung auf die Nachbarn (Pretzsch 2009). Auf diese Weise können inner- und zwischenartliche Interaktionen besser nachgebildet sowie die Produktivität und Dynamik von komplexen Mischbeständen modellhaft abgebildet und damit besser verstanden werden (Abbildung 7). Eine Schwachstelle bei solchen Ansätzen ist unter anderem die mangelhafte Abbildung der Kronenlänge beziehungsweise Kronenansatzhöhe, die für die Schätzung der Zuwachsleistung der Krone und ihrer mechanischen Stabilität besonders wichtig ist. Weiter gehen bisherige Ansätze von einer mehr oder weniger homogenen Füllung des Kronenraumes eines Baumes mit Blattmasse aus und vernachlässigen, dass eine gegebene Blattfläche je nach ihrer räumlichen Anordnung sich sowohl auf die Produktivität, als auch auf die Konkurrenz- und Verdrängungswirkung auf Nachbarn sehr unterschiedlich auswirken kann (Grote & Pretzsch 2002).

Die Grösse und Form der Krone sowie ihre Plastizität unter Konkurrenz bestimmen ausserdem die Jahrringbreite, Astigkeit und Holzdicke und damit zentrale Kriterien der Holzqualität (Seifert 2003). Weiter bestimmen die Kronenmerkmale die Stabilität von Bäumen und Beständen gegenüber Störungen. Kleine, kurze Kronen sind besonders anfällig für Sturm- und Eisbruch.<sup>1</sup> Grosse, dominante Kronen können hingegen besondere Anziehung auf waldzerstörende Käfer ausüben (Cole & Amman 1969). Bezüglich der Vielfalt von Pflanzen- und Tierarten gilt, dass diese mit steigender Heterogenität des Kronendaches (Variabilität der Stamm- und Astdurchmesser, Rauigkeit des Kronendaches durch Grössenunterschiede der Kronen, Auswölbung der Kronen bei geringer Packungsdichte) in der Regel zunimmt (Begon et al 1998). Wenn also Modellansätze oder Simulatoren den Anspruch haben, neben Ertragsgrössen auch solche Wirkungen und Leistungen des Waldes abzubilden, wird eine räumlich-zeitliche

Abbildung der Kronenformdynamik notwendig. Voraussetzung ist in jedem Fall eine ausreichend solide Datenbasis über die Kronengrösse und Plastizität in Abhängigkeit unter anderem vom Entwicklungsstadium des Baumes, von der Konkurrenzsituation und den Standortbedingungen. Diese werden erst über den standardmässigen Einsatz der TLS-Technologie zugänglich.

#### Einsatz zur Baumartenerkennung

Sind die Zusammenhänge zwischen Kronendimensionen, Baumdimension und Biomassebesetzung bekannt, so können diese Funktionen zum Beispiel zur Arterkennung benutzt werden. Wurden bisher vor allem empirisch ermittelte Biomasseverteilungen (Holmgren & Persson 2004) oder verallgemeinerte Kronenformen (Weinacker et al 2004) verwendet, um die Baumart zu bestimmen, können nun standortunabhängige, allometrische Zusammenhänge für jede Baumart einbezogen werden. Zudem erlaubt die Kenntnis über die Biomasseverteilung in der Oberschicht wiederum einen Rückschluss auf mögliche zwischen- und unterständige Bäume, die sonst zum Beispiel aus flugzeuggetragenen Laserscanning nur schwer extrahiert werden können. Die hier untersuchten Zusammenhänge bilden daher wieder einen Baustein, um ein Regelwerk zur Automatisierung aufzustellen und reichen weiter bis hin zur genaueren Volumenschätzung und Holzqualitätsbestimmung aus luftgestützten Aufnahmen.

#### Schlussfolgerungen und Perspektiven

Angesichts des grossen Potenzials des TLS-Einsatzes ist eine durchgehende Entwicklungslinie von

<sup>1</sup> SPELLMANN H (1996) Leistung und Windstabilität von Fichten-Buchen-Mischbeständen. In: Proc Jahrestagung 1996 Dt Verb Forstl Forschungsanst, Sek Ertragskd, 20–22 Mai 1996, Neresheim Deutschland. pp. 46–56.

der Planung der Laseraufnahme bis hin zur statistischen Auswertung der prozessierten Scannerdaten anzustreben. Ein zentraler Baustein hierfür ist der Aufbau einer Programm-Bibliothek, in der Datenschnittstellen so definiert werden, dass ein gemeinsamer Standard für die unterschiedlichen im Einsatz befindlichen terrestrischen Laserscanner erreicht wird. Ähnlich wie bei den schon seit Langem existierenden Bildverarbeitungs-Programmpaketen, die Daten- und Bearbeitungsschnittstellen für die Auswertung von Bildern unterschiedlichster Herkunft bereitstellen, muss ein solcher Rahmen auch für die Verarbeitung und Analyse von TLS-Daten entwickelt werden. In Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern in Kanada, USA und Südafrika wird zurzeit am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München eine solche Programm-Bibliothek aufgebaut. ■

Eingereicht: 30. August 2010, akzeptiert (mit Review): 21. April 2011

## Dank

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projekts SFB TRR 38 zum Thema «Strukturen und Prozesse der initialen Ökosystementwicklung in einem künstlichen Wassereinzugsgebiet», dem British Columbia Ministry of Forests, Mines and Lands für die Förderung des Projektes «Crown competition, crown efficiency, tree growth and site type: quantification with terrestrial LIDAR» (Y113162, Y102162, Y091162) und dem Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur für die Förderung des Bayern-Québec-Kooperationsprojektes 10307 «Evaluierung des Einsatzes terrestrischer Laserscanner für die Wissenschaft im Bereich der Waldwachstumsmodellierung».

## Literatur

- ASSMANN E (1961) Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. München: BLV. 490 p.
- BÉGIN E, BÉGIN J, BÉLANGER L, RIVEST LP, TREMBLAY S (2001) Balsam fir self-thinning relationship and its constancy among different ecological regions. *Can J For Res* 31: 950–959.
- BEGON ME, HARPER JL, TOWNSEND CR (1998) Ökologie. Heidelberg: Spektrum. 750 p.
- CESCATTI A (1997) Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. Model structure and algorithm. *Ecol Model* 101: 263–274.
- CLAWGES R, VIERLING L, CALHOON M, TOOMEY M (2007) Use of a ground-based scanning lidar for estimation of biophysical properties of western larch (*Larix occidentalis*). *Int J Remote Sens* 28: 4331–4344.
- COLE WE, AMMAN GD (1969) Mountain pine beetle infestations in relation to lodgepole pine diameters. Ogden: USDA, Forest Service, Research Note INT-95. 8 p.
- DISNEY M, LEWIS P, SAICH P (2006) 3D modelling of forest canopy structure for remote sensing simulations in the optical and microwave domains. *Remote Sens Environ* 100: 114–132.
- DROSTE HÜLSHOFF B (1969) Struktur und Biomasse eines Fichtenbestandes auf Grund einer Dimensionsanalyse an oberirdischen Baumorganen. München: LMU München, PhD thesis. 209 p.
- DURRIEU S, ALLOUIS T, FOURNIER R, VÉGA C, ALBRECH L (2008) Spatial quantification of vegetation density from terrestrial laser scanner data for characterization of 3D forest structure at plot level. [http://geography.swan.ac.uk/silvilaser/SilviLaser\\_2008\\_Proceedings.pdf](http://geography.swan.ac.uk/silvilaser/SilviLaser_2008_Proceedings.pdf) (21.4.2011)
- EDELSBRUNNER H, KIRKPATRICK DG, SEIDEL R (1983) On the shape of a set of points in the plane. *IEEE T Inform Theory* 29: 551–559.
- ENQUIST BJ, WEST GB, BROWN JH (2009) Extension and evaluations of a general quantitative theory of forest structure and dynamics. *P Natl Acad Sci* 106: 7046–7051.
- ENQUIST BJ, BROWN JH, WEST GB (1998) Allometric scaling of plant energetics and population density. *Nature* 395: 163–165.
- GROTE R, PRETZSCH H (2002) A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biol* 4: 167–180.
- HENNING JG, RADTKE PJ (2006) Ground-based laser imaging for assessing three-dimensional forest canopy structure. *Photogramm Eng Rem Sens* 72: 1349–1358.
- HOLMGREN J, PERSSON A (2004) Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sens Environ* 90: 415–423.
- HOSOI F, OMASA K (2007) Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable lidar imaging. *J Exp Bot* 58: 3463–3473.
- HUANG P, PRETZSCH H (2010) Using terrestrial laser scanner for estimating leaf areas of individual trees in a conifer forest. *Trees* 24: 609–619. doi: 10.1007/s00468-010-0431-z
- LEEUWEN VAN M, NIEUWENHUIS M (2010) Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *Eur J Forest Res* 129: 749–770. doi: 10.1007/s10342-010-0381-4
- LOVELL JL, JUPP DLB, CULVENOR DS, COOPS NC (2003) Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Can J Remote Sens* 29: 607–622.
- MÜLLER J, BRANDL R (2009) Assessing biodiversity by remote sensing in mountainous terrain: the potential of LiDAR to predict forest beetle assemblages. *J Appl Ecol* 46: 897–905.
- OLDEMANN RAA (1990) Forests: Elements of Silvology. Berlin: Springer. 624 p.
- OSAWA A (1995) Inverse relationship of crown fractal dimension to self-thinning exponent of tree populations: a hypothesis. *Can J For Res* 25: 1608–1617.
- PRETZSCH H, BIBER P, DURSKEY J (2002) The single tree based stand simulator SILVA. Construction, application and evaluation. *For Ecol Manage* 162: 3–21.
- PRETZSCH H (2006) Species-specific allometric scaling under self-thinning. Evidence from long-term plots in forest stands. *Oecologia* 146: 572–583.
- PRETZSCH H (2009) Forest dynamics, growth and yield. Berlin: Springer. 664 p.
- PRETZSCH H (2010) Re-evaluation of allometry: State-of-the-art and perspective regarding individuals and stands of woody plants. *Progress Bot* 71: 339–369.

- RAHMAN MZA, GORTE BGH (2009)** Tree crown delineation from high resolution airborne Lidar based on densities of high points. <http://laserscanning2009.ign.fr/index.php?proceedings=1> (21.4.2011)
- ROLOFF A (2001)** Baumkronen. Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. Stuttgart: Ulmer. 164 p.
- SEIFERT S (2006)** Visualisierung von Waldlandschaften. Allg Forst Z Waldwirtsch Umweltvorsorge 61: 1170–1171.
- SEIFERT S (2010)** Modellierung und Visualisierung des Waldwachstums auf Landschaftsebene. Göttingen: Univ Göttingen, PhD thesis. 120 p.
- SEIFERT T (2003)** Integration von Holzqualität und Holzsortierung in behandlungssensitive Waldwachstumsmodelle. Weihenstephan: Techn Univ München, PhD-Thesis. 314 p.
- WEINACKER H, KOCH B, HEYDER U, WEINACKER R (2004)** Development of filtering, segmentation and modelling modules for LiDAR and multispectral data as a fundament of an automatic forest inventory system. [www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/WEINACKER.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/WEINACKER.pdf) (22.4.2011)
- WELLER DE (1987)** A reevaluation of the 3/2 power rule of plant self-thinning. *Ecol Monographs* 57: 23–43.
- WEST GB, BROWN JH, ENQUIST BJ (1997)** A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science* 276: 122–126.
- WEST GB, ENQUIST, BJ, BROWN JH (2009)** A general quantitative theory of forest structure and dynamics. *P Natl Acad Sci* 106: 7040–7045.
- YODA KT, KIRA T, OGAWA H, HOZUMI K (1963)** Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *J Inst Polytech*: 14: 107–129.
- ZEIDE B (1985)** Tolerance and self-tolerance of trees. *For Ecol Manage* 13: 149–166.
- ZEIDE B (1987)** Analysis of the 3/2 power law of self-thinning. *For Sci* 33: 517–537.
- ZEIDE B (1998)** Fractal analysis of foliage distribution in loblolly pine crowns. *Can J For Res* 28: 106–114.

## Beitrag des terrestrischen Laserscannings zur Erfassung der Struktur von Baumkronen

Vorliegender Beitrag zeigt das Potenzial des terrestrischen Laserscannings (TLS) zur Beschreibung und Modellierung von Baumkronen. Zunächst wird eine allgemeine Modellvorstellung der metabolischen und strukturellen Skalierung von Baumkronen entwickelt. Dabei werden diejenigen Parameter besonders hervorgehoben, die erst über TLS direkt messtechnisch zugänglich werden, so die individuellen Blattflächen, die konvexe Hülle der Krone und das Muster ihrer Raumbfüllung mit Blattmasse. Das mündet in theoretisch basierten, empirisch validierten artspezifischen Kronenstrukturmodellen, wie sie für die Quantifizierung der Struktur- und Artendiversität in Wäldern, die Erfassung von Biomasse und C-Vorräten, die fernerkundliche Baumartenerkennung oder das Verständnis von Raumbesetzungs-, Mischungs- und Selbstausdünnungsprozessen bisher fehlen. Dank wiederholten TLS-Aufnahmen kann das bislang zerstreut vorliegende und auf Momentaufnahmen basierende Detailwissen über Aufbau und Entwicklung von Kronen zu einer konsistenten Modellvorstellung zusammengeführt werden.

## Contribution de la technique du balayage laser terrestre pour le relevé de la structure des couronnes des arbres

La présente contribution démontre le potentiel du balayage laser terrestre (BLT) pour la description et la modélisation des couronnes d'arbres. Tout d'abord, un modèle de classement métabolique et structurel des couronnes a été développé. Dans ce processus, les paramètres pouvant être mesurés directement par le BLT, tels que la surface foliaire individuelle, l'enveloppe convexe de la couronne et la répartition de la masse foliaire dans l'espace, ont été favorisés. Il en résulte des modèles de structure de couronnes, fondés théoriquement et validés empiriquement, spécifiques à chaque essence; tels que ceux qui faisaient défaut jusqu'à présent pour quantifier la diversité des structures et des espèces en forêt, relever les réserves de biomasse et de dioxyde de carbone, reconnaître les essences par la télédétection ou connaître les processus de répartition dans l'espace, de mélange et de sélection naturelle. Les connaissances, jusqu'à présent éparses et basées sur des relevés uniques, de la structure et du développement des couronnes peuvent être aujourd'hui synthétisées en un modèle cohérent à l'aide de relevés BLT réitérés.