



VecTree – Konzepte zur 3D Modellierung von Laubbäumen aus terrestrischem Lidar

SEBASTIAN LAMPRECHT, JOHANNES STOFFELS & THOMAS UDELHOVEN, Trier

Keywords: Baummodell, Astwinkel, Holzvolumen, Forst, terrestrisches Lidar

Zusammenfassung: Diese Arbeit stellt einige Konzepte zur 3D-Modellierung von Laubbäumen aus terrestrischem Lidar vor, indem ein neuartiger Ansatz (VecTree) nach LAMPRECHT (2013) beschrieben wird, der sich als eine Weiterentwicklung von Slicing Ansätzen versteht. Das Modell nutzt Querschnittsradien zur Beschreibung der Oberfläche als eine Folge von Kegelstümpfen, was einer Beschreibung als hierarchischer Graph entspricht. Die Modellierung erfolgt iterativ in Wuchsrichtung, indem Suchbereiche um jeden ermittelten Querschnitt definiert werden. Die Topologie der Punkte wird durch ein Clustering abgebildet, welches die paarweise Distanz von Punkten, also den Abstand jedes einzelnen Punktes zu allen anderen Punkten, berücksichtigt. Die Identifikation eines Ast- bzw. Stammquerschnittes erfolgt jeweils durch Anpassung eines Ausgleichskreises.

In diesem Artikel wird der Modellierungsansatz Schritt für Schritt erläutert sowie auf dessen Implementierung eingegangen. Durch den Ansatz sollen vor allem alternative Möglichkeiten zur Modellierung und Beschreibung von Baumstämmen bzw. Ästen, z. B. zur Optimierung der Volumenschätzung und Bestimmung von Astdurchmessern oder -winkeln, aufgezeigt werden.

Summary: *VecTree – Concepts for 3D modelling of deciduous trees from terrestrial Lidar.* This paper presents some concepts for 3D-modeling of deciduous trees using terrestrial Lidar, by presenting a novel approach (VecTree) by LAMPRECHT (2013), which considers itself as a further developed slicing approach. The model takes advantage of cross-section radii to describe the surface as a series of truncated cones, which corresponds to a hierarchical graph. The modelling is done iteratively in the growing direction, in which search spheres are defined around each determined cross section. The topology of the points is represented by a clustering approach, which considers the pairwise spatial neighbourhood of the points. The identification of a branch or trunk section is done by fitting a circle to each slice.

In this paper the modelling approach is explained step by step and the implementation is described too. This approach shall mainly propose alternative concepts of modelling for the description of the trunks or branches, e.g. to optimize the volume estimations or the determination of branch diameters or angles.

1 Einleitung

1.1 Bedeutung

Für eine nachhaltige multifunktionale Nutzung von Wäldern, z. B. Forstwirtschaft, CO₂-Sequestrierung und energetische Nutzung, ist eine genaue Kenntnis bestimmter forstlicher Parameter, unter anderem Stammdurchmesser, Baumhöhe und Waldstruktur (vgl. BWALDINV 3 2007) notwendig, die regelmäßig in terrestrischen Inventuren (vgl. BWALDG 2010) erfasst werden. Auf Grundlage dieser Daten können so unter anderem

Holzvorratsschätzungen (vgl. BREITENBACH & ASTRUP 2012) durchgeführt aber auch wichtige Eingangsgrößen für Klimamodelle abgeleitet werden. Diese zeitaufwendigen manuellen Messungen sind im Vergleich zur Messgenauigkeit von terrestrischem Lidar teilweise mit hohen Fehlern behaftet. Zudem werden nicht alle für eine dynamische forstliche Wachstumsmodellierung relevanten Informationen der Baumarten erfasst, wie beispielsweise Aussagen zum Konkurrenzverhalten, unter anderem Astwinkel, Wuchsrichtung. Vor diesem Hintergrund können flugzeuggestützte und terrestrische Lidar-Messungen eine wertvolle

le Ergänzung darstellen, da aus diesen Daten über 3D-Modelle forstlich relevante Informationen abgeleitet werden können.

Das flugzeuggestützte Lidar hat sich erfolgreich zur Erhebung von forstlich und ökologisch relevanten Waldstrukturparametern etabliert. Beispielsweise werden in den Arbeiten von REITBERGER et al. (2009), ZHOU et al. (2010) oder DUNCANSON et al. (2014) Einzelbäume aus luftgestütztem Lidar identifiziert, so dass je nach Ansatz Parameter wie die Baumhöhe (RMSE von bis zu unter 0,5 m; vgl. KAARTINEN et al. 2012) oder der Kronendurchmesser bzw. die Kronenfläche ermittelt werden können. Ein Problem bei der Verwendung flugzeuggestützter Daten liegt jedoch in den sich überlappenden Kronenbereichen, was insbesondere in dichten Waldbeständen die Identifikation von Einzelbäumen erschwert (vgl. KAARTINEN et al. 2012). Da so die Form der Einzelbäume nicht genau bekannt ist, können Strukturparameter auf Einzelbaumebene nur mit größeren Unsicherheiten ermittelt werden. Auch können Zustandsgrößen wie das Stammvolumen oder die Kronenstruktur nur empirisch ermittelt werden.

Diese Schwierigkeiten lassen sich durch TLS-Messungen (Terrestrial Laser Scan) teilweise lösen, da insbesondere die Aststruktur detaillierter abgebildet werden kann. Die Nutzung von terrestrischen Lidar im Wald ist bisher wegen des hohen Messaufwands meist auf Einzelfallstudien beschränkt. Beispielsweise wird zur dritten Bundeswaldinventur (BWI) weiterhin auf traditionelle Verfahren wie die Winkelzählprobe zurückgegriffen (vgl. BMELV 2011). Dabei bieten TLS-Messungen aufgrund der im Vergleich zu flugzeuggestütztem Lidar höheren räumlichen Auflösung ein erhebliches Potential, um die Geometrie von Bäumen genauer zu erfassen. So können beispielsweise Erkenntnisse über das Wachstums- und Konkurrenzverhalten, die Verteilung des Holzvorrates oder die Änderung der Biomasse (vgl. KAASALAINEN et al. 2014) gewonnen werden. Solche detaillierten TLS-Messungen können über statistische Verfahren wie „small area estimation“ mit flächigen luftgestützten Messungen kombiniert werden, um genauere flächenbezogene Zustandsvariablen zu erhalten (vgl. BREITENBACH & ASTRUP 2012).

1.2 *Stand der Forschung und Motivation*

In jüngerer Vergangenheit wurden zahlreiche Ansätze zur geometrischen Modellierung von Bäumen aus terrestrischem Lidar entwickelt. Es zeigen sich Parallelen einiger Ansätze, bei denen der Stamm und die Äste eines Baumes in verschiedene Segmente unterteilt werden, die eine hierarchische Graph-Struktur bilden (vgl. DELAGRANGE et al. 2014, RAUMONEN et al. 2013). Die Oberfläche wird in der Regel durch geometrische Primitive wie Zylinder (vgl. RAUMONEN et al. 2013, EYSN et al. 2013) oder Kegelstümpfe (vgl. DELAGRANGE et al. 2014) beschrieben. Im Allgemeinen wird das Problem der Oberflächenmodellierung in mehrere Teilprobleme zerlegt, bei denen entweder Astquerschnitte identifiziert werden (vgl. HILDEBRANDT & LOST 2012, HACKENBERG et al. 2014), indem zunächst eine Form des Clusterings vorgenommen wird, oder Teilflächen schrittweise zu Segmenten zusammengesetzt werden, indem die Oberflächenstruktur analysiert wird (vgl. RAUMONEN et al. 2013, DELAGRANGE et al. 2014). Insbesondere die erstgenannten Ansätze nutzen die Wuchsrichtung der Bäume zur Modellierung aus. Beispielsweise sind etablierte circle-fitting-Verfahren bei einer hohen Anzahl an Scans in der Lage, das Holzvolumen mit Fehlern von 2% unter bis 6% über einem Referenzvolumen zu bestimmen (vgl. PUESCHEL et al. 2013). So generierte Modelle stellen unter anderem Parameter wie Baumhöhe, Holz- und Stammvolumen, nutzbares Holzvolumen, Astwinkel, Querschnittsradien, Kronenvolumen und Kronenfläche bereit (siehe HACKENBERG et al. 2014).

Bei geringer Datenqualität, beispielsweise durch eine niedrige Anzahl an Scans, treten Datenlücken durch Abschattungseffekte auf. Diese führen in der Regel dazu, dass die Verästelungsstruktur nicht vollständig rekonstruiert werden kann und somit eine Rekonstruktion notwendig wird (vgl. RAUMONEN et al. 2013) oder Teile der Krone nicht erfasst werden. In dieser Arbeit soll daher ein Verfahren vorgestellt werden, welches eine Modellierung in Wuchsrichtung (ähnlich zu HACKENBERG et al. 2014) vornimmt. Dabei werden Lösungsstrategien erarbeitet, die eine höhere Robustheit gegen Datenlücken erreichen sol-

len. Durch diese Konzepte sollen die in der Arbeit von PUESCHEL et al. (2013) genannten Unsicherheiten der Volumenschätzung (von -34% bis +44%, s.o.) bei einem Einzelscan reduziert bzw. eine allgemeine Reduktion der Unsicherheiten bei einer geringen Anzahl an Scans erreicht werden.

1.3 Ziele und Methoden

In diesem Artikel wird ein vektorieller Ansatz zur geometrischen Modellierung von Einzelbäumen und Beständen auf Basis von TLS entwickelt (VecTree). Ein besonderes Augenmerk wird auf die variable und komplexe Stamm- und Astoberflächenstruktur von Laubbäumen gelegt. Im Vergleich zu Nadelbäumen zeichnen sich Laubbäume durch ein komplexeres Wuchsverhalten aus. Unterschiedliche Asthaltungswinkel, wechselnde Wuchsrichtungen, sowie ineinandergreifende Strukturen erfordern eine dynamische geometrische Modellierung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zunächst theoretische Überlegungen zur geometrischen Struktur von Laubbäumen und die Konzeption des Modells vorgestellt. Darauf aufbauend wird der Algorithmus schrittweise erläutert und auf dessen Parametrisierung eingegangen. Das entwickelte Modell soll wichtige forstliche und geobotanische Parameter explizit bereitstellen.

Mit diesem Beitrag soll weniger dieses konkrete Modell propagiert, sondern vor allem konzeptuelle Überlegungen zur Modellierung von Laubbäumen sowie die Verarbeitung von terrestrischen 3D-Daten vorgestellt und diskutiert werden. Daher beschränkt sich die Auswertung der Ergebnisse auf eine Validierung anhand der TLS-Punktwolke, während im Diskussionsteil aufgetretene Probleme und Vorschläge für zukünftige Modellierungsansätze thematisiert werden.

2 Datengrundlage

Als Datengrundlage dienten vom Fach Umweltfernerkundung und Geoinformatik der Universität Trier durchgeführte TLS-Messungen einer forstlichen *ForeStClim*-Versuchsfäche (siehe FAWF 2015) in Merzalben,

(Rheinland-Pfalz, Deutschland; GK Koordinaten: Rechtswert 2631521, Hochwert 5461217). Eine rund 0,25 ha große Teilfläche bildet einen Mischbestand (siehe LEIMBROCK 2012), der von einem ca. 30-jährigen Buchenbestand und einer ca. 25-jährigen Douglasienfläche bestanden ist. Von besonderem forstökologischem Interesse ist dabei die direkte Konkurrenzzone zwischen beiden Baumarten.

Zur Messung wurde der *Laser Scanner Photon 120* der Firma *FARO* verwendet (siehe FARO 2009), der bei einer Messdistanz von 25 m eine Positionierungsgenauigkeit von ± 2 mm erreicht. Der verwendete ungefilterte Datensatz weist bei 10 m Entfernung zum Scanner einen mittleren Punktabstand von 3,2 cm und einen Median des Punktabstandes von 0,8 cm auf. Es werden etwa zwanzig Bäume auf einer Fläche von ca. 30 m \times 30 m aus dem Konkurrenzbereich zwischen Buche und Douglasie abgebildet.

Da die Messung nur von einem Standpunkt durchgeführt wurde, weist der Datensatz Ast- und Stammquerschnitte mit sichelförmiger Geometrie mit Datenlücken durch Abschattungen von Objekten auf. In dieser Studie wurden explizit diese problematischen Daten verwendet, um die Entwicklung robuster Konzepte zu fördern. Dies wird als sinnvoll erachtet, da in der Praxis die Anzahl und Auflösung der Scans aus Zeit- und Kostengründen möglichst gering gehalten werden sollte und kürzere Messzeiten Störungen durch Windeffekte vermindern. Wind verursacht, dass sich vor allem dünne Äste während der Messung bewegen, was dazu führt, dass diese mehrfach abgebildet werden und ein wellenförmiger oder unscharfer Eindruck entsteht.

3 Methoden

3.1 Modellierungsansatz

Das Modell beschreibt einen einzelnen Baum als eine Menge von Segmenten, die an die Oberfläche des Stammes und der Äste angepasst werden. Ein Segment entspricht geometrisch einem Kegelstumpf, der durch einen in Wuchsrichtung gerichteten Vektor $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$ zwischen den Mittelpunkten der Kegelstumpf-

grundflächen und die zugehörigen Radien beschrieben wird. Die Verzweigungsstruktur des Baumes wird durch die Organisation der Segmente als hierarchischer Graph abgebildet, so dass die Segmente an ihren Endpunkten verbunden werden. Daher entspricht der Vektor \vec{v} einer Kante des Graphen zwischen seinem *parent*- (Ortsvektor) und seinem *child*-Knoten. Ein Knoten K wird durch seinen Knotenpunkt $kp_K \in \mathbb{R}^3$, der Mittelpunktkoordinate seiner Kegelstumpffläche, und dem Knotenradius $r_K \in \mathbb{R}^+$, dem Radius seiner Kegelstumpffläche, definiert. Die hierarchische Struktur des Graphen ermöglicht Verzweigungen, indem sich mehrere Segmente einen gemeinsamen *parent*-Knoten teilen, während sich die *child*-Knoten paarweise unterscheiden, weil auf diese Weise neue Äste des Graphen generiert werden.

Da der *parent*-Knoten eines Segmentes dem *child*-Knoten eines vorangegangenen Segmentes entspricht, stimmen die Radien ihrer angrenzenden Kegelstumpfflächen überein. Die Oberfläche des Baumes wird so über die gemeinsame Oberfläche der Kegelstümpfe, sowie an den Knotenpunkten jeweils durch eine an den Querschnitt angepasste Kugel, beschrieben.

Die Modelloberfläche wird in Abb. 1 illustriert. Hier werden die Knoten und Vektoren über den Index $i \in \mathbb{N}$ unterschieden, so dass

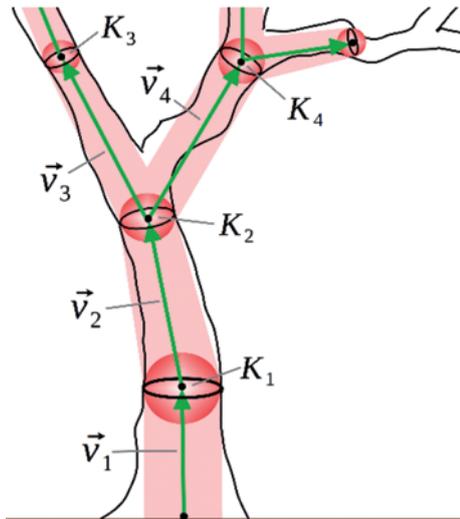


Abb. 1: Konzeptionelle geometrische Modellierung der Oberfläche eines Stammes mit Ästen durch Anpassung von Kegelstümpfen.

ein Vektor \vec{v}_i eine Kante zwischen seinem *parent*-Knoten K_{i-1} und *child*-Knoten K_i bildet. Für den Stammansatz wird eine vertikale Wuchsrichtung angenommen, so dass er einem vertikalen Zylinder entspricht.

Die Approximation des Modells an stark verzweigte Bäume soll durch eine dynamische Wahl der Kegelstumpflänge anhand der Ast- bzw. Stammdurchmesser erreicht werden. Durch dieses Vorgehen wird gleichzeitig eine gewisse Skalunenabhängigkeit sichergestellt, so dass im Folgenden keine konzeptionelle Unterscheidung zwischen Stamm und Ästen vorgesehen wird.

Um das Vektormodell herzuleiten, wurde ein iterativer Ansatz mit den Teilschritten 1. *Layerselektion* (Auswahl möglicher Querschnitte aus der Punktwolke), 2. *Knotenbestimmung* (Auffinden von Clustern und Mittelpunktbestimmung über Anpassen eines Kreises) und 3. *Plausibilitätsprüfung* (Fehleranalyse) entwickelt. Das Flussdiagramm (Abb. 2) stellt den Ablauf des Ansatzes detailliert dar und verdeutlicht den Einsatz der Modellparameter. Im Folgenden wird auf das Flussdiagramm über die Abkürzung „(F-x)“ verwiesen, wobei x auf den entsprechenden Teilschritt verweist.

3.2 Layerselektion

Die Suche nach möglichen Stammquerschnitten erfolgt angelehnt an bestehende Slice-Ansätze (siehe PUESCHEL et al. 2013) in Layern einer Dicke $h \in \mathbb{R}$. Zum Auffinden dieser Querschnitte wird zunächst ein erster horizontaler Layer L_{First} in einer bestimmten Höhe $s \in \mathbb{R}$ über Grund, beispielsweise an der für forstwirtschaftliche Messungen genutzten „Brusthöhe“, in der Regel 1,30 m, gewählt (siehe F-1). Alle weiteren Layer L_j werden ausgehend von den bereits ermittelten Knotenpunkten, ähnlich wie in der Arbeit von HACKENBERG et al. (2014) bestimmt (siehe F-11). Dabei werden zu einem bestimmten Knoten K alle Punkte innerhalb einer in Wuchsrichtung aufgespannten Teilsphäre – eines bestimmten Winkels α und der Mächtigkeit h – zu einem Layer zusammengefasst (siehe Abb. 3).

Der Sphärenradius R_j , welcher in etwa der Länge des anzupassenden Kegelstumpfes ent-

spricht, wird dynamisch nach (1), anhand des zuvor ermittelten Knotenradius $r_K \in \mathbb{R}^+$ und des Längenfaktor-Parameters $l \in \mathbb{R}^+$, bestimmt.

$$R_l := \frac{h}{2} + l \cdot r_K \tag{1}$$

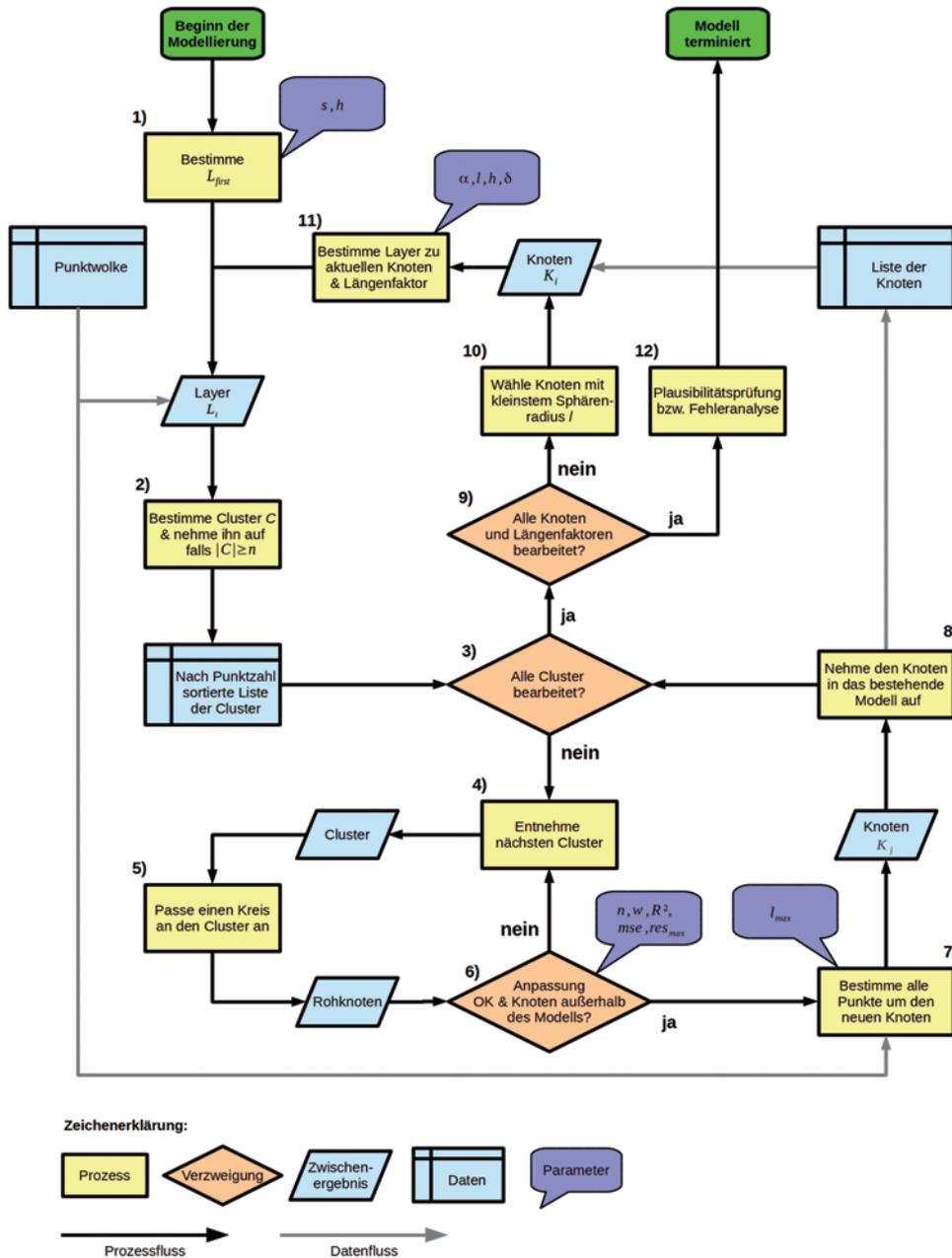


Abb. 2: Flussdiagramm des vorgestellten Modellierungsansatzes.

Auf diese Weise richtet sich die Länge der modellierten Segmente nach dem Durchmesser des Astes bzw. Stamms. Um die Modellierung auch in Bereichen geringer Punktdichte oder Datenlücken fortführen zu können, sollen auch unterschiedliche Längenfaktoren und Sphärenwinkel aus einer Liste gewählt werden können, die nacheinander ausgewertet werden.

Die Definition einer Teilsphäre zum Knotenpunkt kp_K mit Richtungsvektor \vec{v} wird in Abb. 3 illustriert. Zur Konstruktion wird der Schnitt einer zum Hilfspunkt q (2) aufgespannten Kugel mit Radius c (3) zur Sphäre mit Radius R_l und Dicke h verwendet. Demnach definiert sich ein Layer L_j zu einem Knoten K durch alle Punkte aus der Punktwolke P , die in innerhalb der aufgespannten Teilsphäre liegen.

$$q := kp_K + \left(R_l + \frac{h}{2} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \quad (2)$$

$$c := \left(R_l + \frac{h}{2} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \quad (3)$$

Die Selektion von Teilsphären stellt, im Unterschied zum Ansatz von HACKENBERG et al.

(2014), sicher, dass eine Verzweigung nur in einem vordefinierten plausiblen Winkelbereich in Wuchsrichtung erfolgen kann. Durch die Wahl unterschiedlicher Längenfaktoren wird es möglich, Bereiche geringerer Punktdichte oder Datenlücken, z. B. durch Abschätzung, zu überbrücken. Bedingung ist hierfür, dass sich eine solche Lücke zwischen dem Knotenpunkt kp_K und dem Layer L_j befindet. Daher richtet sich die maximal überbrückbare Ausdehnung einer Datenlücke nach dem Sphärenradius R_l so, dass sie unterhalb des Wertes $l_{max} \cdot r_K$ (mit maximalem Längenfaktor l_{max}) liegt.

3.3 Identifikation potentieller Querschnitte

Um potentielle Querschnitte innerhalb eines Layers L_j zum Knoten K zu identifizieren, soll die räumliche Nähe der Punkte zueinander berücksichtigt werden. Hierzu werden zunächst Cluster über die δ -Umgebung der Punkte bestimmt (siehe F-2). Dabei definiert sich ein Cluster $C_{L_j, p_0, \delta}$ (in der laufenden Arbeit nur noch als C bezeichnet) zu einem Layer L_j und seinem Ausgangspunkt $p_0 \in L_j$ nach (4). Diese Cluster entsprechen daher den Ergebnissen des DBSCAN-Ansatzes (vgl. ESTER et al.

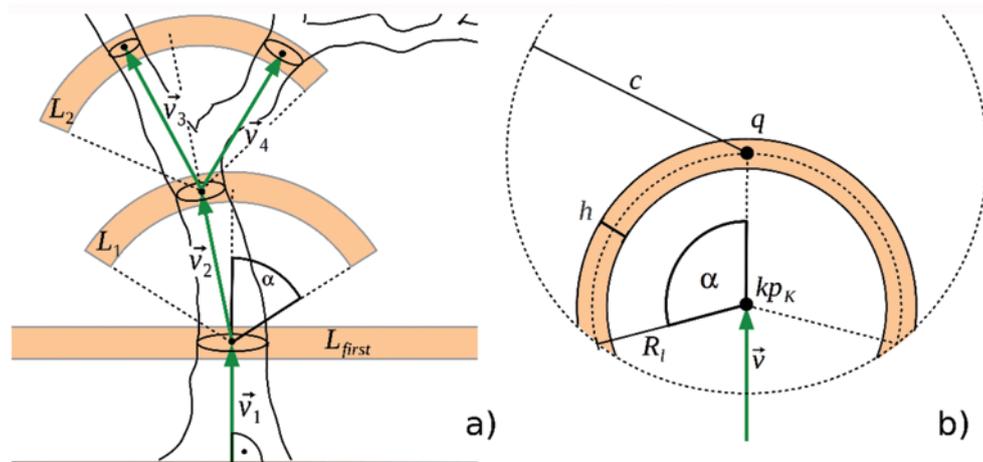


Abb. 3: a) Vektorieller Ansatz mit aufgespannten Teilsphären (orange Flächen) zur Selektion von Querschnitten. b) Definition einer Teilsphären zum Knotenpunkt kp_K und Richtungsvektor \vec{v} über den Schnitt einer Kugel mit zugehöriger Sphäre der Dicke h , Sphärenwinkel α und Längenfaktor l . Der 3D-Layer L_j wird über den Sphärenradius R_l (1), den Hilfspunkt q (2), sowie den Radius c (3) konstruiert.

1996) mit einer Mindestzahl an Punkten von $MinPts = 0$.

$$C_{L_j, p_0, \delta} = \left\{ p \in L_j : \left(\|p - p_0\| \leq \delta \right) \vee \left(\exists p_c \in C_{L_j, p_0, \delta} : \|p - p_c\| \leq \delta \right) \right\} \quad (4)$$

Der Radius δ richtet sich vornehmlich nach der geometrischen Auflösung des Datensatzes, so dass er so gewählt werden sollte, dass Querschnitte nicht zerfallen. Durch diese Art des Clusterings wird eine Identifikation der Oberfläche ermöglicht, bei der der Anteil an potentiellen Ausreißern gering ist.

Die so geclusterten Punkte werden im Folgenden zur Kreisanpassung verwendet, da angenommen wird, dass sie einen potentiellen Querschnitt bilden. Daher muss die Anzahl der Punkte eines Clusters mindestens $n \in \mathbb{N}_{\geq 3}$ betragen, wobei zur Überbestimmung des Gleichungssystems n deutlich größer drei gewählt werden sollte.

Zur Vereinfachung der ersten Implementierung wurde die Definition eines Clusters über den Bufferradius δ durch eine kubische *Bounding Box* mit Kantenlängen δ ersetzt. Zudem werden die Cluster des ersten Layers durch eine zweidimensionale δ -Umgebung bestimmt, da zunächst von einer vertikalen Wuchsrichtung ausgegangen wird.

3.4 Knotenbestimmung

Für jeden Cluster wird zunächst ein potenzieller Knoten bestimmt, indem ein dreidimensionaler Ausgleichskreis an die Punkte des Clusters durch Minimierung der Residuen angepasst wird. Durch Betrachtung der Modellgüte wird im Nachhinein entschieden, ob eine Kreisform wahrscheinlich ist und so der Knoten in das bestehende Modell aufgenommen werden kann.

Hierfür wird in einem ersten Schritt angelehnt an die Idee von UMBACH & JONES (2003) über die Methode der kleinsten Quadrate eine Kugel mit dem Mittelpunkt $b_m = (x_m, y_m, z_m) \in \mathbb{R}^3$ und dem Radius $r \in \mathbb{R}$ angepasst. Dies entspricht einer Minimierung der Residuen zu allen Punkten p aus dem aktuellen Cluster C :

$$\min_{b_m, r} \sum_{p \in C} \left(r - \|p - b_m\|_3 \right)^2 \quad (5)$$

Falls keine angemessene Kugelanpassung besteht, wird der Punkt verworfen und der nächste Cluster gewählt. Als Qualitätsmaß dient der RMSE bezüglich des Abstandes der Punkte aus C zu b_m in Relation zu r . Hierzu gibt der Nutzer einen gewissen Schwellwert vor.

Für eine genauere Anpassung des Querschnitts wird daraufhin der entsprechende Cluster gegen den Vertikalwinkel β des Vektors zwischen dem Kugelmittelpunkt b_m und dem *parent*-Knotenpunkt kp_K rotiert (vgl. Abb. 4), was eine Projektion des Querschnitts in die Ebene ermöglicht. Daher kann anschließend analog zu (5) eine Kreisanpassung im verebneten Clusters C' vorgenommen werden (6). Die L2-Norm wird hierzu über die x- und y-Komponenten gebildet.

$$\min_{b'_m, r} \sum_{p' \in C'} \left(r - \|p' - b'_m\|_2 \right)^2 \quad (6)$$

Zur Rücktransformation werden die transformierten unverebneten z-Koordinaten gemittelt und der resultierende z-Wert dem Mittelpunkt b'_m zugeschrieben. Der Drehwinkel ergibt sich aus der Summe des Winkels β und dem Vertikalwinkel zwischen kp_K und b'_m . Dieser Mittelpunkt zusammen mit dem ermittelten Kreisradius stellt einen potentiellen *child*-Knoten zu seinem *parent*-Knoten K dar. Die Plausibilität des neu bestimmten Knotens wird in der gegebenen Implementierung durch folgende Tests geprüft (F-6). Falls eine

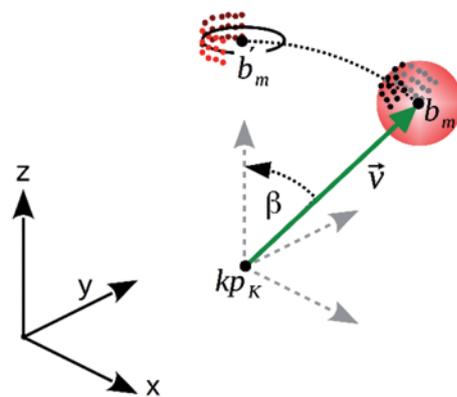


Abb. 4: Rotation des Kugelmittelpunktes b_m um den parent-Knoten kp_K über den Vertikalwinkel β .

der Bedingungen verletzt wird, wird der Knoten verworfen.

1. Der ermittelte Radius muss geringer als der maximal zu erwartende Radius r_{max} eines Stamms sein.
2. Die Güte der Kreisanpassung wird über die quadrierten Residuen anhand des Parameters mse geprüft.
3. Um eine fehlerhafte Anpassung durch Ausreißer zu vermeiden, wird ein maximales Residuum von höchstens $maxres$ erwartet.
4. Um sicherzustellen, dass die Punkte nicht auf einer Geraden liegen und so keine Kreisform zu erwarten ist, wird eine lineare Regression durchgeführt, deren Bestimmtheitsmaß den Schwellwert $maxlinear$ nicht überschreiten darf.
5. Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass sich Äste zur Krone hin verzweigen. Daher wird durch den Schwellwert $maxincrease$ eine unerwartete Zunahme des Querschnittsradius von einem Segment zum nächsten unterbunden.

Da für einen neu bestimmten Knoten nicht ausgeschlossen werden kann, dass er sich mit der bestehenden Modelloberfläche schneidet, wird zusätzlich seine räumliche Lage evaluiert. Eine solche Überlappung ist theoretisch möglich, da mehrere Längenfaktoren l gewählt werden können und ein „Überspringen“ (siehe Abschnitt 3.5) auftreten kann. Da die Modelloberfläche an einem Knotenpunkt

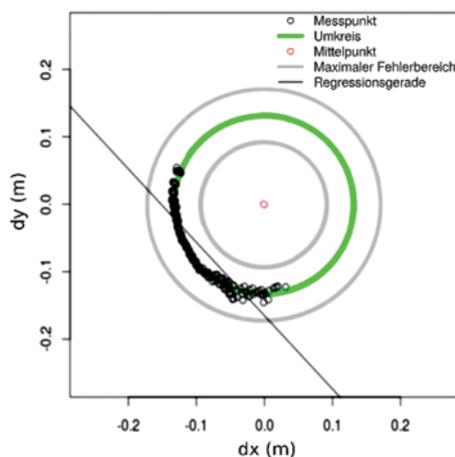


Abb. 5: Modellausgabe eines Querschnittes zur Prüfung der Plausibilität.

kp_k durch eine Kugel mit Radius r_k definiert wird, wird getestet, ob der Abstand des Knotenpunktes zur Modelloberfläche mindestens r_k beträgt (siehe hierzu Abschnitt 3.6).

3.5 Modellierungsreihenfolge

Die Modellierung beginnt mit dem Aufsuchen der Stammansätze über die Selektion des ersten Layers (siehe Abschnitt 3.2 und F-1) aus der Punktwolke und der anschließenden Clusteranalyse (F-2). Die anschließende Knotenbestimmung erfolgt nacheinander für die nach ihrer Punktzahl absteigend sortierten Cluster mit mindestens n Punkten, da angenommen wird, dass größere Cluster mit höherer Wahrscheinlichkeit einem Querschnitt angehören. Zudem kann im Allgemeinen erwartet werden, dass bei einem in mehrere Cluster zerfallenen Querschnitt, der Cluster mit der höchsten Anzahl an Punkten die beste Kreisanpassung erzielt (siehe Abb. 6).

Nach der Analyse des ersten Layers L_{First} ist für die weitere Modellierung die Wahl des als nächstes zu analysierenden Knotens von besonderer Bedeutung. Um auch dünnere Äste (Astdurchmesser kleiner 5 cm) modellieren zu können, wird jeweils versucht, einen möglichst kleinen Bereich um die Knoten zu analysieren. Daher wird immer die Teilssphäre mit dem kleinsten Sphärenradius R_i zur weiteren

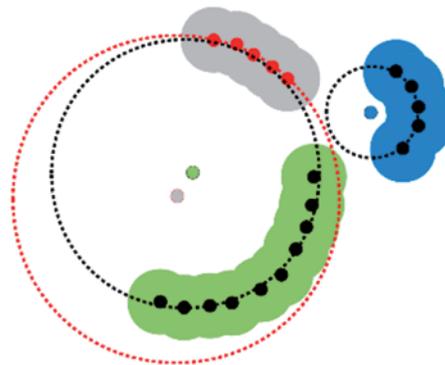


Abb. 6: Überlegungen zur Kreisanpassung an Cluster mit unterschiedlicher Anzahl an Punkten. Eigenständiger Querschnitt (blauer Cluster) und „zerfallener“ Querschnitt aus Teilclustern (grün und grau). Die Kreisanpassung des größeren (grünen) Clusters approximiert den kleineren (grauen) Cluster.

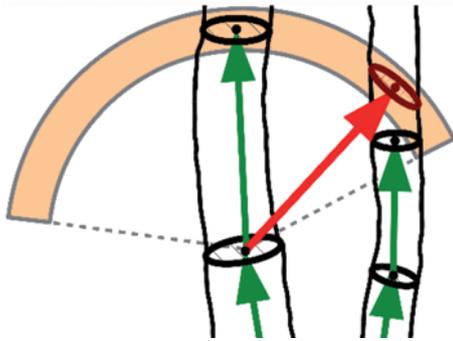


Abb. 7: Problem des „Überspringens“ bei der Modellierung benachbarter Äste (schwarze Linien). Grüne Pfeile stehen für optimal erkannte Vektoren, rote Pfeile für „übergesprungene“ Vektoren. Die gestrichelten Linien illustrieren die aufgespannten Teilsphären.

Analyse gewählt (F-10). Durch die Ausrichtung der Teilsphäre in Wuchsrichtung werden mit erhöhter Wahrscheinlichkeit nur Astquerschnitte identifiziert, die von diesem Segment abzweigen. Knoten mit größerem Knotenradius spannen hingegen größere Teilsphären auf, die dazu führen können, dass auch Querschnitte von benachbarten Ästen modelliert werden. Dieses „Überspringen“ (vgl. Abb. 7) stellt ein konzeptionelles Problem dar, welches auch in der Arbeit HACKENBERG (2014) beschrieben wird. Durch die geordnete Modellierung von kleinen zu großen Durchmessern kann dieses Problem gemindert werden.

Nach der Auswahl eines Knotens und Selektion des für den Längenfaktor und Sphärenwinkel aufgespannten Layers L_j werden die Cluster bestimmt (F-2). Die Cluster werden wieder nach der Punktzahl absteigend sortiert, der jeweilige Knotenpunkt ermittelt (F-4 bis F-8), dessen Plausibilität geprüft (F-6) und gegebenenfalls der Knoten ins bestehende Modell integriert (F-8). Das Modell terminiert, wenn zu jedem bereits ermittelten Knoten alle Längenfaktoren abgearbeitet wurden (F-9).

3.6 Plausibilitätsprüfung

Nach abgeschlossener Initialisierung des Modells erfolgt a posteriori eine Plausibilitätsprüfung (F-12) anhand der Punktwolke. Um

den Analyseaufwand zu reduzieren, wird diese Prüfung nur für die Punkte durchgeführt, deren Abstand zu einem Knoten geringer als der maximal zu diesem Knoten angenommene Sphärenradius ist. Die Prüfung eines Punktes erfolgt anhand seines Normalabstandes ε zur Modelloberfläche. Zur Berechnung dieses Abstandes wird der Normalabstand h zum Richtungsvektor \vec{v} bestimmt, sowie der Radius R_{mod} des Kegelstumpfes auf selber Höhe q ermittelt, so dass gilt: $\varepsilon = h - R_{mod}$. Als Residuum eines Punktes wird das Minimum des Normalabstandes zu allen Segmenten angenommen.

Diese Residuen werden für eine visuelle Plausibilitätsprüfung sowie für eine Sichtung statistischer Kennwerte wie mittlerer Fehler, Standardabweichung oder RMSE genutzt. Diese Form der Plausibilitätsprüfung eignet sich jedoch nur zu einer Abschätzung der Modellgüte, da keine Klassifizierung der Punkte *hölzern* oder *nicht hölzern* vorgenommen werden kann.

4 Implementierung

Die Implementierung des Modells erfolgte mit der Statistik-Software R (R FOUNDATION 2014). Zum performanten Datenzugriff wird die Punktwolke in einer *PostGIS*-Datenbank (OS-GEO 2014) vorgehalten. Daher erfolgt die Organisation und Analyse in R, während räumliche Selektionen über SQL-Anfragen erfolgen.

Da die Oberflächengeometrie stark von der Baumart abhängt, ist für ein optimales Modellierungsergebnis die Parametrisierung entsprechend an die zu erwartenden Wertebereiche anzupassen (Abschnitt 5.1). Alle für die Modellierung relevanten Parameter, sowie die in dieser Studie gewählten Werte werden in Tab. 1 zusammengefasst sowie deren Wertebereich und Bedeutung erläutert.

5 Modellierungsergebnisse

5.1 Parametrisierung

Während der Implementierung des Ansatzes wurden nachfolgende Erkenntnisse zur Sensitivität der Modellparameter aufgrund von

Tab.1: Übersicht der Modellparameter.

Parameterbezeichnung	Wertebereich	Beschreibung	Verwendete Werte
<i>Parameter zur Layerselektion</i>			
FIRSTLAYERHEIGHT S	\mathbb{R}^+ (m)	Höhe des ersten Layers L_{First}	1,3
LAYERTHICKNESS h	\mathbb{R}^+ (m)	Dicke eines Layers	0,05
VECTORLENGTH l	\mathbb{R}^+	Liste von Längenfaktoren	4;3;2;5
BRANCHANGLE α	(0,180) (°)	Liste der Sphärenwinkel	40;60;80;30
<i>Parameter zur Clusteranalyse</i>			
DELTA δ	\mathbb{R}^+ (m)	Radius der δ -Umgebung	0,03
MINAREA	\mathbb{R}^+ (m ²)	Mindestfläche der Cluster von L_{First}	0,005
MINPOINTS n	$\mathbf{N}_{\geq 3}$	Mindestpunktzahl eines Querschnitts	10
<i>Parameter zur Knotenbestimmung</i>			
ERROR mse	(0,1)	Maximaler MSE der Kreisanpassung	0,05
MAXRES res_{max}	(0,1)	Maximaler Fehler der Kreisanpassung	0,35
MAXLINEAR R^2	(0,1)	Maximale lineare Anpassung	0,95
MAXRAD r_{max}	\mathbb{R}^+ (m)	Maximaler Radius eines Querschnitts	0,35
MAXINCREASE w	\mathbb{R}^+	Maximale Zunahme des Radius	2

theoretischen Überlegungen zur iterativen Modellierung und Testläufen erzielt.

Die Sensitivität der Parameterkombinationen von Längenfaktor l und Sphärenwinkel α , sowie deren Anzahl wirken sich im Besonderen auf die Modellstruktur und -qualität aus. Daher ist eine besonders sorgsame Anpassung dieser Parameter notwendig. Um das beschriebene Problem des „Überspringens“ zu vermeiden, werden möglichst kleine Sphären angestrebt, was geringe Werte für l und α erfordert. Kleine Längenfaktoren führen zudem tendenziell zu einer genaueren Modellierung der Oberfläche, da so die Segmente relativ kurz sind und die maximalen Residuen gering ausfallen. Zu kleine Suchbereiche führen hingegen zu einer nur teilweisen Erfassung des Kronenraumes, da so Querschnitte nicht vollständig identifiziert werden können. Zudem besteht durch zu geringe Sphärenwinkel die Möglichkeit, dass Astgabelungen nicht erfasst werden können.

Die Schwellwerte zur Knotenbestimmung werden entsprechend des Qualitätsanspruches angepasst. Zu hohe Anforderungen führen dazu, dass reale Querschnitte nicht in das Modell aufgenommen werden, so dass hier wieder nur Teile des Kronenraumes erfasst werden können. Allgemein sollte die Auswahl dieser Modellparameter auf Grundlage von Expertenwissen erfolgen.

Zur Clusteranalyse sollte der Nutzer anhand der Punktdichte entscheiden, welcher Radius δ und welche Layerdicke h für eine adäquate Detektion von Querschnitten sinnvoll erscheint. Hierbei kann angenommen werden, dass im Falle des Abstandes zwischen zwei Punkten in der Größenordnung der geometrischen Auflösung eines Einzelscans benachbarte Punkte eine Oberfläche bilden. Da die Auflösung innerhalb des Scans variiert, sollte δ in etwa der zu erwartenden geometrischen Auflösung in Baumhöhe entsprechen. Die Layerdicke h sollte analog zu Slicing-Ansät-

zen wenige Zentimeter (ca. 5 bis 10) betragen. Da auch dieser Parameter von der Punktdichte abhängt, sollte er groß genug gewählt sein, damit ein Querschnitt auch bei größerer Entfernung zum Scanner hinreichend viele Messpunkte enthält. Ein zu groß gewähltes h reduziert hingegen die Möglichkeit, dass die projizierten Punkte einen runden Querschnitt bilden.

5.2 Validierung

Zur Validierung des Modellansatzes wurde zunächst manuell eine für den Testdatensatz geeignete Parametrisierung ermittelt, die sich in Tab. 1 findet. Da das Modellierungskonzept primär zur Beschreibung von Laubbäumen entwickelt wurde, werden nur die Ergebnisse der modellierten Buchen vorgestellt. Die Validierung erfolgt hier ausschließlich anhand der TLS-Punktwolke, da diese Arbeit vor allem die Modellierungskonzepte vorstellen soll, die zur Optimierung bestehender Ansätze verwendet werden könnten. Eine weiterführende Validierung anhand generierter Punktwolken (vgl. RAMOUNEN et al. 2013, HACKENBERG et al. 2014) wurde daher nicht vorgenommen.

Da die Modellierung eines Baumes in Wuchsrichtung erfolgt, erfasst das Modell in der Regel die Krone nicht vollständig. Falls beispielsweise die Annahme runder Quer-

schnitte nicht erfüllt ist oder Datenlücken, z. B. durch Abschattung, auftreten, kann die Modellierung für diese Bereiche nicht fortgesetzt werden. Um dennoch eine Vorstellung der Verteilung der Residuen zu erhalten, werden zur Validierung nur die TLS-Punkte betrachtet, die sich in unmittelbarer Nähe zum Modell befinden, so dass ihr Abstand mindestens einem Knoten kleiner $R_1 + 0.5 h$ (mit maximalem Längenfaktor l_{max}) sein soll. Des Weiteren werden zur Darstellung der Histogramme (Abb. 8) und zur Berechnung der Tendenzmaße hier nur Punkte aus P_c betrachtet, die ein Residuum kleiner 10 cm aufweisen. Der Wert von 10 cm wurde so gewählt, dass das Rauschen und Fehler durch nur teilweise erfasste Äste reduziert werden. Immerhin bleiben bei diesem Wert in beiden Datensätzen mehr als 90% der Punkte trotz der etwas verrauschten Datengrundlage in der Betrachtung erhalten. Das Residuum von 10 cm ist somit ein für die Datensätze empirisch ermittelter Wert.

Für diese Bäume (Buchen) ergibt sich ein Mittelwert der Residuen von 0,3 cm bzw. 0,4 cm, eine Standardabweichung von 1,5 cm bzw. 1,6 cm und ein RMSE von 1,5 cm bzw. 1,7 cm. Durch die Einschränkung der Punktauswahl durch einen Maximalabstand von 10 cm könnten jedoch die Fehlermaße etwas kleiner als tatsächlich vorhanden ausfallen. Die Form der Histogramme legt eine annä-

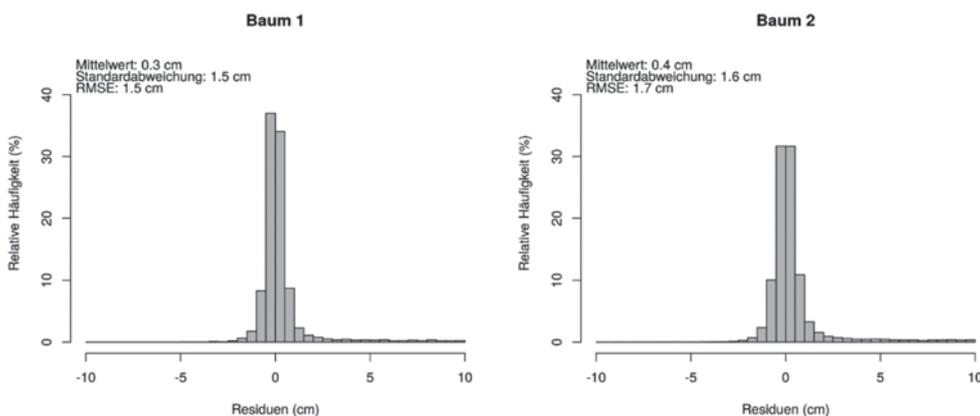


Abb. 8: Histogramme der Normabstände (Residuen) der betrachteten TLS-Punktwolke P_c bezüglich der modellierten Oberfläche. Hier werden ausschließlich Punkte betrachtet, die einen Abstand kleiner 10 cm aufweisen.

hernde Normalverteilung nahe. Es wird deutlich, dass für beide Modelle mehr als 60% der Punkte innerhalb eines Fehlerbereiches von $\pm 0,5$ cm und mehr als 80% der Punkte innerhalb eines Bereiches von ± 1 cm liegen. Eine höhere Modellgüte ist bei einer günstigeren Datengrundlage, z. B. mit mehreren Scanrichtungen, zu erwarten.

Die dreidimensionale Struktur der betrachteten Buchen als Vektormodell und die räumliche Verteilung der Residuen werden in Abb. 9 und Abb. 10 illustriert. Es wird deutlich, dass durch die Modellierung als eine Folge von Kegelstümpfen eine kontinuierliche Oberfläche ohne sprunghaften Anstieg zwischen zwei Segmenten entsteht. Die Modellierung des Stammbereiches erfolgt fast vollständig mit Residuen unterhalb 2 mm. Die hier rot erscheinenden Punkte mit Residuen deutlich über 10 cm werden überwiegend durch Noise oder vereinzelt auch durch kleine Äste oder Blätter verursacht. Im unteren Stammbereich zeigt sich jedoch, dass die zur Vereinfachung angenommene vertikale Wuchsrichtung nicht eingehalten wird. Insbesondere Abb. 10 zeigt, dass grundsätzlich Astgabeln erfasst werden können, dass aber nicht jeder Ast identifiziert werden kann. Für Baum 1 sieht man, dass eine Überschätzung des Querschnittsradius an Astgabeln möglich ist, falls wie hier die Annahme eines runden Querschnittes verletzt wird.

Es konnte neben den hier abgebildeten Ergebnissen auch beobachtet werden, dass bei ungünstiger Parametrisierung Astgabeln erst um ein Segment versetzt erfasst werden oder das Problem des „Überspringens“ auftritt.

6 Diskussion

In der Detailansicht der Astgabelungen in Abb. 10 wird deutlich, dass die dynamische Wahl der Vektorlängen anhand des Querschnittsradius eine unmittelbare Reaktion an geänderte Querschnitte beispielsweise nach einer Astgabel ermöglicht. Dadurch wird die gewünschte Skalunenabhängigkeit des Ansatzes erreicht, welche diesen insbesondere zur Modellierung von Laubbäumen geeignet macht.

Die geordnete Abarbeitung der Knoten von kleinen zu großen Durchmessern (siehe Abschnitt 3.5) stellt eine alternative Lösung des „Überspringen“-Problems gegenüber dem starren „Order“-Konzept von DELAGRANGE et al. (2014) dar. Gegenüber DELAGRANGE et al. (2014) ist für den VecTree-Ansatz eine Wahl unterschiedlicher Längenfaktoren l möglich, so dass eine Überbrückung von Datenlücken einer maximalen Ausdehnung in Wuchsrichtung von $l_{max} \cdot r_K$ (mit maximalem Längenfaktor l_{max} und Knotenradius r_K) erreicht wird (siehe Abschnitt 3.2). Die Einschränkung der Sphären über die Sphärenwinkel α garantiert zusätzlich eine Einschränkung der Astwinkel auf plausible Werte. Die Modellierungsergebnisse haben gezeigt, dass die Konzepte dieses Ansatzes auch bei minderer Datenqualität dazu geeignet sind, komplexe Baumoberflächen zu beschreiben. Dadurch könnte es möglich sein, die Robustheit ähnlicher Ansätze (wie HACKENBERG et al. 2014) durch Integration unterschiedlicher Längenfaktoren zu optimieren und damit die Anforderungen an die Datengrundlage zu reduzieren.

Eine Beschreibung der Oberfläche als ein Graph von Kegelstümpfen erwies sich bereits bei der Arbeit von DELAGRANGE et al. (2014) als besonders geeignet, um Ast- oder Stammoberflächen zu beschreiben. Durch dieses Vorgehen werden Artefakte der Residuen benachbarter Punkte an den Segmentübergängen wie beispielsweise durch eine Modellierung als Zylinder (vgl. RAMOUNEN et al. 2013, EYSN et al. 2013) vermieden.

Die Modellierung in Wuchsrichtung kann dazu führen, dass einzelne Äste nicht erfasst werden. In diesem Fall können ganze Teilbereiche eines Baumes nicht modelliert werden. Alternative Ansätze wie RAMOUNEN (2013) rekonstruieren die Teiloberflächen schrittweise, so dass potenziell alle Astsegmente erfasst werden können. Als ein Nachteil gegenüber dem VecTree-Ansatz ist jedoch die nicht unbedingt eindeutige Rekonstruktion des Graphen zu nennen.

Das vorgestellte Clustering-Verfahren, welches dem DBSCAN-Verfahren (vgl. ESTER et al. 1996) mit $MinPts = 0$ entspricht, kann sich für TLS-Punktwolken gegenüber einem DBSCAN mit einer höheren Anzahl an Nachbarn als vorteilhaft erweisen. Dies

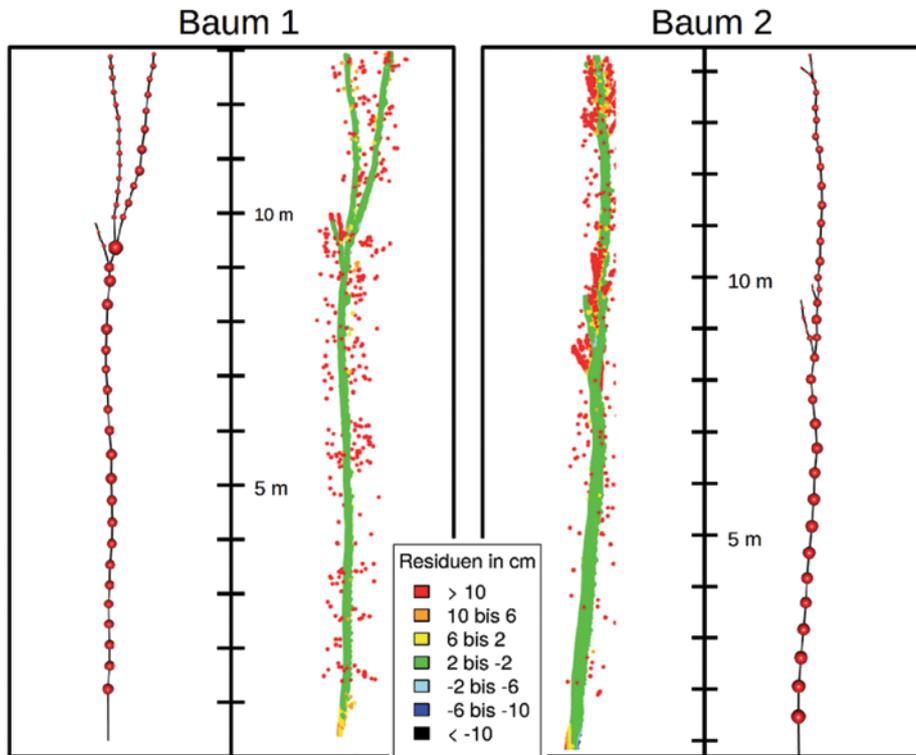


Abb. 9: Zwei modellierte Buchen. Äußere Grafiken: Vektormodell, dessen Knoten als rote Kreise mit entsprechenden Querschnittsradien dargestellt werden. Innere Grafiken: Farbkodierte Darstellung der Normalabstände aller betrachteten TLS-Punkte zur Modelloberfläche.

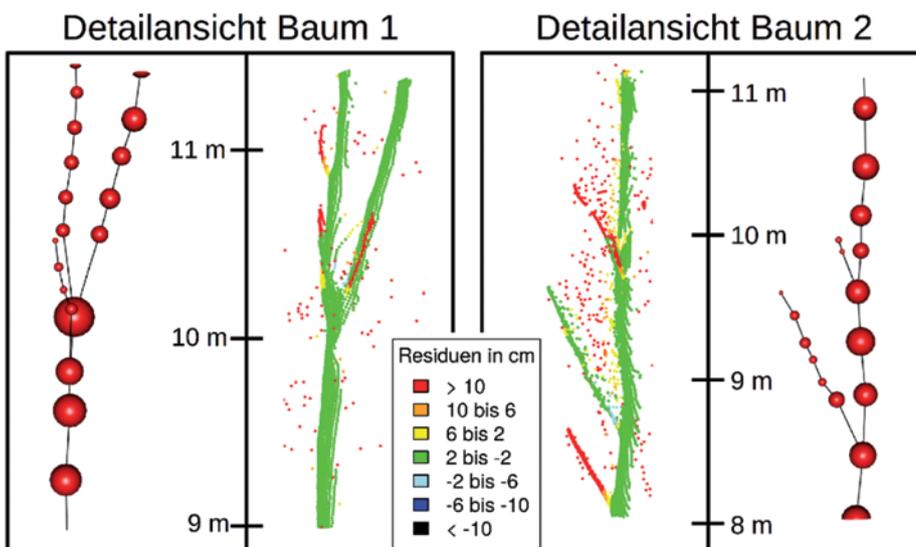


Abb. 10: Detailansicht ausgewählter Verzweigungen aus Abb. 9.

liegt darin begründet, dass nur der Distanzparameter δ definiert werden muss, der sich stark nach der erwarteten geometrischen Auflösung in Kronenhöhe richtet. Auf diese Weise kann δ deutlich kleiner gewählt werden. Außerdem ist das Clustering weniger abhängig von der Dichte s .

Die Effekte unterschiedlicher Scan-Modi auf die Genauigkeit einer Kreisanpassung an Stammquerschnitte wurden bereits in PUESCHEL et al. (2013) beschrieben. Daher kann davon ausgegangen werden, dass auch die Genauigkeit der Kreisanpassungen mit der Anzahl an Scans aus unterschiedlichen Richtungen deutlich ansteigt.

Der Algorithmus kann Störungen der Daten durch Windeffekte nicht kompensieren. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass durch die erhöhte Robustheit gegenüber Datenlücken die Anzahl und Auflösung der Scans gering gehalten werden kann, so dass sich insgesamt eine geringere Messdauer ergibt. Durch die geringere Aufnahmezeit reduzieren sich tendenziell die Störungen durch Wind.

7 Ausblick

Zur Optimierung der Kegelstumpfradien und -positionen könnten entweder iterativ oder simultan alle Kegelstümpfe an die umliegenden Punkte angepasst werden. Ein ähnliches Verfahren wird für Zylinder bereits in dem Ansatz von RAMOUNEN et al. (2013) angewandt, indem die Start- und Endpositionen sowie die Radien der Zylinder aufeinander abgestimmt werden. Zusätzlich könnte die Kreisanpassung durch geeignete alternative Verfahren optimiert werden, die weniger von Ausreißern beeinträchtigt sind.

Für eine ausführliche Validierung des entwickelten Modells sollte das Modell zusätzlich auf künstlich generierte Punktwolken (vgl. RAMOUNEN et al. 2013, HACKENBERG et al. 2014) mit bekannter Oberfläche und Volumen oder an reale exakt vermessene Referenzobjekte angewendet werden.

Literatur

- BMELV (2011): Aufnahmeanweisung für die dritte Bundeswaldinventur 2011 – 2012. – 2. Geänderte Auflage, Mai 2011, BMELV (Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz), Bonn.
- BREITENBACH, J. & ASTRUP, A., 2012: Small area estimation of forest attributes in the Norwegian National Forest Inventory. – *European Journal of Forest Research* **12** (131): 1255–1267.
- BUNDESWALDGESETZ (BWALDG), 2010: Bundeswaldgesetz vom 2.5.1975 i. d. F. vom 31.7.2010 (BGBl. I S. 1037), §41a Walderhebungen.
- BWALDINVV 3, 2007: Bundeswaldinventurverordnung auf Grundlage §41a Abs. 4 Bundeswaldgesetz vom 2. Mai 1975 (BGBl. I S. 1037).
- DELAGRANGE, S., JAUVIN, C. & ROCHON, P., 2014: PypeTree: A Tool for Reconstructing Tree Perennial Tissues from Point Clouds. – *Sensors* **14** (3): 4271–4289; doi: 10.3390/s140304271.
- DUNCANSON, L.I., COOK, B.D., HURTT, G.C. & DUBAYAH, R.O., 2014: An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems. – *Remote Sensing of Environment* **14** (154): 378–386; doi: 10.1016/j.rse.2013.07.044.
- ESTER, M., KRIEGEL, H., SANDER, J. & XU, X., 1996: A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. – *KDD Proceedings* **96**: 226–231.
- EYSN, L., PFEIFER, N., RESSL, C., HOLLAUS, M., GRAFL, A. & MORSDORF, F., 2013: PypeTree: A Practical Approach for Extracting Tree Models in Forest Environments Based on Equirectangular Projections of Terrestrial Laser Scans. – *Remote Sensing* **13** (5): 5424–5448; doi: 10.3390/rs5115424.
- FARO 2009: FARO Laser Scanner Photon 120/20. – http://www.dirdim.com/pdfs/DDI_FARO_Laser_Scanner_Photon.pdf (17.12.2014).
- FAWF (FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALDÖKOLOGIE UND FORSTWIRTSCHAFT), 2015: Rheinland-Pfalz, ForeStClim. – <http://www.forestclim.eu/> (19.1.2015).
- HACKENBERG, J., MORHART, C., SHEPPARD, J., SPIECKER, H. & DISNEY, M., 2014: Highly Accurate Tree Models Derived from Terrestrial Laser Scan Data: A Method Description. – *Forests* **14** (5): 1069–1105.
- HILDEBRANDT, R. & LOST, A., 2012: From points to numbers: a database-driven approach to convert terrestrial LiDAR point clouds to tree volumes. – *European Journal of Forest Research* **12** (131): 1857–1867; doi: 10.1007/s10342-012-0638-1.
- KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J., YU, X., VASTARANTA, M., HYYPPÄ, H., KUKKO, A., HOLOPAINEN, M., HEIPKE,

- C., HIRSCHMUGL, M., MORS DORF, F., NÆSSET, E., PITKÄNEN, J., POPESCU, S., SOLBERG, S., WOLF, B.M. & WU, J., 2012: An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning. – *Remote Sensing* **12** (4): 950–974; doi: 0.3390/rs4040950.
- KAASALAINEN, S., KROOKS, A., LISKI, J., RAUMONEN, P., KAARTINEN, H., KAASALAINEN, M., PUTTONEN, E., ANTTILA, K. & MÄKIPÄÄ, R., 2014: Change Detection of Tree Biomass with Terrestrial Laser Scanning and Quantitative Structure Modelling. – *Remote Sensing* **14** (6): 950–974; doi: 10.3390/rs6053906.
- LAMPRECHT, S., 2013: Vektorielle Modellierung von Forstbeständen aus terrestrischen Laserscanner-Daten. – Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science an der Universität Trier, https://www.uni-trier.de/fileadmin/fb6/prof/FER/Publikationen/Lamprecht_bachelorarbeitVektorielleModellierung_2013 (12.1.2015).
- LEIMBROCK, L.A., 2012: Zuwachs und Konkurrenzverhalten von Buchen und Douglasien auf der Versuchsfläche Merzalben (Pfälzerwald). – Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science an der Universität Trier.
- OSGeo, 2014: PostGIS. – <http://www.postgis.net> (17.12.2014).
- PUESCHEL, P., NEWNHAM, G., ROCK, G., UDELHOVEN, T., WERNER, W. & HILL, J. 2013: The influence of scan mode and circle fitting on tree stem detection, stem diameter and volume extraction from terrestrial laser scans. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **13** (77): 44–56; doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.12.001.
- R FOUNDATION, 2014: The R Project for Statistical Computing. – <http://www.r-project.org> (17.12.2014).
- RAUMONEN, P., KAASALAINEN, M., ÅKERBLOM, M., KAASALAINEN, S., KAARTINEN, H., VASTARANTA, M., HOLOPAINEN, M., DISNEY, M. & LEWIS, P., 2013: Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. – *Remote Sensing* **13** (5): 491–520; doi: 10.3390/rs5020491.
- REITBERGER, J., SCHNÖRR, C., KRZYSZEK, P. & STILLA, U., 2009: 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **9** (64): 561–574; doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.4.002.
- UMBACH, D. & JONES, K.N., 2003: A Few Methods for Fitting Circles to Data. – *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **3** (20): 1881–1885.
- ZHOU, J., PROISY, C., DESCOMBES, X., HEDHLI, I., BARBIER, N., ZERUBIA, J., GASTELLU-ETCHEGORRY, J.P. & COUTERON, P., 2010: Tree crown detection in high resolution optical and LiDAR images of tropical forest. – *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology* **10** (12); doi: 10.1117/12.865068.

Anschrift der Autoren:

B.Sc. SEBASTIAN LAMPRECHT, Dr. JOHANNES STOFFELS & Prof. Dr. THOMAS UDELHOVEN, Universität Trier, Fachbereich VI – Raum- und Umweltwissenschaften, D-54286 Trier, Tel: +49-651201-4612, -4698, -4513, e-mail: {lamprecht} {stoffels} {udelhoven}@uni-trier.de

Manuskript eingereicht: September 2014
Angenommen: Februar 2015