

# Segmentierung von Entfernungsbildern zur Registrierung von Laserscannerpunktewolken in Waldbeständen

ANNE BIENERT<sup>1</sup>, HANS-GERD MAAS<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren vorgestellt, das basierend auf Entfernungsbildern von zwei terrestrischen Laserscanneraufnahmen eine regionenorientierte Segmentierung mit dem Ziel einer Grobregistrierung durchführt. Verdeckungen im oberen Kronenbereich, hervorgerufen von Ästen und Zweigen, beeinflussen das Segmentierungsergebnis und resultieren in einer Übersegmentierung. Um diesen Effekt zu überbrücken, verwendet die Konnektivitätsanalyse ein relativ großes Strukturelement sowie ein entfernungsabhängiges Ähnlichkeitsmaß. Eine im Anschluss durchgeführte Baumpositionsbestimmung auf Basis der Segmentierungsergebnisse liefert die homologen Punkte der unterschiedlichen Standpunkte. Bei der Punktzuordnung kommt RANSAC zum Einsatz. Die letztendliche Registrierung erfolgt über eine Kleinste-Quadrate-Ausgleichung.*

## 1 Einleitung

Seit etwa einem Jahrzehnt wächst das Interesse an terrestrischen Laserscannern in forstwirtschaftlichen und forstwissenschaftlichen Anwendungen. Terrestrische Laserscanner finden u.a. Anwendung bei der Ableitung von forstinventurrelevanten Baumparametern (Hopkinson et al., 2004; Thies & Spiecker 2004, Watt et al., 2005; Maas et al., 2008), zur Extraktion der Aststruktur (Gorte & Pfeifer, 2004; Bucksch & Wageningen, 2006) und bei der Erstellung von Vegetationsmodellen zur Nutzung in numerischen Simulationen zur Bestimmung von Strömungsfeldern (Schlegel et al., 2012; Bienert et al., 2010).

Die Abbildung der komplexen Vegetationsstruktur erfordert meist die Aufnahme von mehreren Standpunkten. Bei der gemeinsamen Datenauswertung dieser Multiple-Scan Datensätze ist die vorherige Registrierung ein essentieller Schritt. So verwendet Wezyk et al. (2007) zum besseren Sichtkontakt Teleskopstäbe an denen die Verknüpfungskugeln angebracht sind. Eine dauerhafte Vermarkung, wie sie in Schilling et al. (2011) verwendet wird, ist bei mehreren zeitlich getrennten Aufnahmen empfehlenswert. Die Aufstellung von künstlichen Verknüpfungspunkten (z.B. Zielmarken, Kugeln, Zylinder) sowie die Herstellung des Sichtkontaktes der Scannerstandpunkte zu den Verknüpfungspunkten ist ein aufwendiger Prozess, der durch eine hohe Bodenvegetation und einen dichten Bestand erschwert wird.

Das Ziel der Arbeit ist die Registrierung von Waldscandaten ohne Verwendung von künstlichen Verknüpfungspunkten auf Basis von Ergebnissen einer regionenorientierten Segmentierung in Entfernungsbildern. In einem ersten Schritt werden die Bodenpunkte separiert (Abschnitt 2.1), da sie eine Verbindung der Bäume untereinander darstellen. In einem zweiten Schritt findet über eine Konnektivitätsanalyse die Segmentierung im Entfernungsbild statt (Abschnitt 2.2).

1) Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden; E-Mail: ([anne.bienert](mailto:anne.bienert)), ([hans-gerd.maas@tu-dresden.de](mailto:hans-gerd.maas@tu-dresden.de))

Der Vorteil der Nutzung der Entfernungsbilder wird bei der Segmentierung der Daten deutlich. Benachbarte Punkte eines gleichen Segments sind durch gleiche Entfernungen gekennzeichnet. Demnach ermöglicht das In- und Dekrementieren der Pixelkoordinaten durch Verwendung eines Strukturelementes einen schnellen und einfachen Zugriff auf benachbarte ins Entfernungsbild transformierte Laserscannerpunkte. Die separierten Segmente bilden die Grundlage für die Baumdetektion (Abschnitt 2.3), die letztendlich homologe Merkmale für die Registrierung der Laserscannerdatensätze (Abschnitt 2.4) liefert.

## 2 Methoden

### 2.1 Elimination von Bodenpunkten

Ein wichtiger Schritt ist die Separierung der Bodenpunkte, da diese eine Verbindung der einzelnen Bäume zueinander darstellen. Ein Beibehalten der Bodenpunkte hätte zur Folge, dass mehrere Bäume in einem Segment zusammengefasst werden, da diese über den Boden miteinander verbunden sind. Ein ähnlicher Separierungsansatz wird in Douillard et al. (2011) vorgestellt.

Die Separierung erfolgt unter Zuhilfenahme des digitalen Geländemodells (DGM), das zuvor durch Analyse der vertikalen Punktdichteverteilung innerhalb einer 3D-Rasterzelle (Bienert et al., 2006) aus der 3D-Punktwolke des Scandatensatzes erstellt wurde. Anschließend werden die 3D-Punktwolke sowie die DGM-Rasterpunkte in einen Voxelaum mit der Kantenlänge  $s_{Voxel}$  transformiert. Voxel, die einen DGM-Rasterpunkt enthalten (rote Voxel in Abb. 1a), gehören zum Voxelsegment der Bodenpunkte. Benachbarte Voxel, die aufgrund der DGM-Rasterweite  $s_{DGM}$  zwischen den DGM-Punkten liegen, werden in einer Konnektivitätsanalyse mit einem dreidimensionalen Strukturelement ebenfalls zum Voxelsegment der Bodenpunkte hinzugefügt. Die Größe des Strukturelements wird maßgeblich durch die Voxelkantenlänge  $s_{Voxel}$  und die DGM-Rasterweite  $s_{DGM}$  bestimmt. Sobald  $s_{Voxel}$  kleiner als  $s_{DGM}$  ist, bestimmt sich die Strukturelementgröße  $o_N$  aus dem Verhältnis:

$$o_N = \left\lceil \frac{s_{dtm} / s_{voxel}}{2} \right\rceil \quad (1)$$

Letztendlich werden diejenigen Laserscannerpunkte, die innerhalb der Voxel des Bodenpunktesegments liegen, aus der Punktwolke entfernt. Somit werden Bodenpunkte, flache Bodenvegetation und Stammansätze gelöscht. Je nach Ausprägung der Bodenvegetation kann die Form des Strukturelementes angepasst werden. Bei einer großen Verhältniszahl  $o_N$  und niedriger Bodenvegetation ist es vorteilhaft das Strukturelement in der Höhe um das Zentralvoxel zu begrenzen ( $X_V \pm o_N$ ;  $Y_V \pm o_N$ ;  $Z_V - o_N$ ), um das "Abschneiden" der Baumansätze so gering wie möglich zu halten.

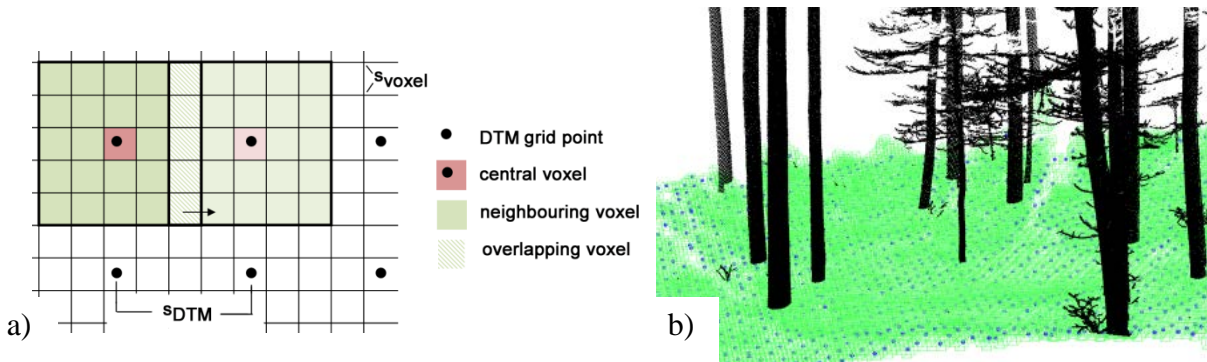


Abb. 1: a) Prinzip der Bodenpunktseparierung in der 2D-Ansicht (Bienert & Schneider, 2013); b) 3D-Punktwolke mit Voxelraum der Bodenpunkte (grün) und DGM-Punkten (blau).

## 2.2 Segmentierung basierend auf Entfernungsbildern

Die Segmentierung von Entfernungsbildern ist ein weitverbreitetes Thema in der aktuellen Literatur (Böhm, 2005), die letztendlich auch zur Detektion von Bäumen in Waldbeständen Anwendung findet. In Haala et al. (2004) und Reulke & Haala (2005) wird eine krümmungsbasierte Segmentierung präsentiert, um Baumstämme in Entfernungsbildern zu detektieren. Der folgende Abschnitt stellt eine regionenorientierte Segmentierung zur Baumdetektion vor.

### 2.2.1 Entfernungsbilder

Basis für die Segmentierung ist ein Entfernungsbild, das aus den 3D-Laserscannerdaten erstellt wurde. In Bienert & Schneider (2013) wurde ein Verfahren nach Vosselman & Klein (2010) vorgestellt, bei dem als Grundlage für das Entfernungsbild Horizontaldistanzen verwendet werden (Abb. 2a). Die Entfernungen  $s_{i,j}$  werden je nach Auflösung  $s_{res}$  (Standardwert  $s_{res} = 0,001$  m; somit entspricht eine Stufe im Entfernungsbild 1 mm) in ganzzahlige Entfernungswerte  $q_{i,j}$  umgerechnet (Gleichung 2) und als Pixelwert hinterlegt.

$$q_{i,j} = \left\lceil \frac{s_{i,j} - s_{\min}}{s_{res}} \right\rceil \quad (2)$$

Werden mehrere Laserscannerpunkte innerhalb eines Pixels detektiert, wird der Punkt mit der kürzesten Entfernung verwendet. Bei einer lotrechten Instrumentenaufstellung und vertikal verlaufenden Objekten innerhalb des Scanbereiches sind in Entfernungsbildern basierend auf Horizontaldistanzen im Gegensatz zu Entfernungsbildern basierend auf Schrägdistanzen kleinere Distanzunterschiede zu benachbarten Pixeln vorhanden (Abb. 2a und b). Besonders sichtbar wird dies bei Scandatenansätzen in Waldbeständen, bei denen die Stämme annähernd vertikal verlaufen (Abb. 2c und d).

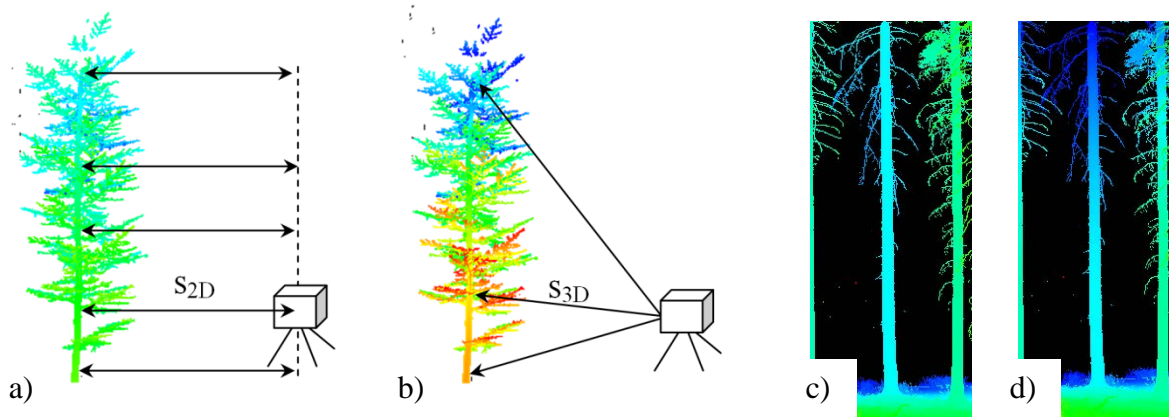


Abb. 2: a) und b.) Prinzip von Entfernungsbildern auf Basis von Horizontal- und Schrägdistanzen; c) und d) Farbcodierte Entfernungsbilder einer Fichte im Bestand; c) Entfernungsbild mit Horizontaldistanz; d) Entfernungsbild mit Schrägdistanz.

### 2.2.2 Segmentierung im 2D-Raum

Die Segmentierung wird mit einer Konnektivitätsanalyse durchgeführt. Ein Strukturelement definierter Größe fährt die Pixel im Entfernungsbild an und überprüft die Entfernungswerte. Nachbarpixel, deren Differenz zum Zentralpixel des Strukturelementes einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten, sind dem gleichen Objekt zugehörig. Zur Visualisierung werden sie mit der gleichen Zufallsfarbe eingefärbt.

Um Verdeckungen durch Äste speziell im Kronenbereich zu überbrücken, wird ein großes Strukturelement (höherer Ordnung) verwendet. Aufgrund des äqui-angularen Scanmusters wächst der Abstand benachbarter Punkte mit zunehmender Entfernung. Dies wiederum kann sich in einem größeren Grenzwert für das Ähnlichkeitsmaß widerspiegeln, der nötig ist um zwei Pixel einem Objekt zuzuordnen. Die Verwendung eines variablen Grenzwertes  $\Delta q_{i,j}^{\max}$ , der sich an die Größe der Entfernung  $s_{i,j}$  anpasst (Gleichung 3), ist somit ein weiterer Unterschied zur klassischen Konnektivitätsanalyse. Der Parameter  $r_{fixed}$  ist der feste Grenzwert des Ähnlichkeitsmaßes für die minimale Entfernung  $s_{min}$ .

$$\Delta q_{i,j}^{\max} = \frac{s_{i,j}}{s_{min}} \cdot r_{fixed} \quad (3)$$

### 2.2.3 Segmentierung im 3D-Raum

Ein zweiter Segmentierungsschritt umfasst das Zusammenfügen von Segmenten im 3D-Raum. Dazu wird das segmentierte Entfernungsbild in den 3D-Raum transformiert. Iterativ werden kleinere Segmente zu größeren Segmenten hinzugefügt, sobald die Horizontaldistanz der Segmentenschwerpunkte innerhalb einer vorgegebenen Distanz  $s_{2D\_SP}$  liegt. Idealerweise sollte  $s_{2D\_SP}$  den mittleren Baumabstand im Bestand nicht überschreiten. Somit werden die verbliebenen kleineren Segmente (speziell im Kronenbereich), die nach der Konnektivitätsanalyse noch vorhanden sind, einem Baumsegment hinzugefügt. Abschließend

werden die zusammengefügt 3D-Segmente in den 2D-Raum zurücktransformiert und als segmentiertes Bild abgespeichert.

### 2.3 Baumdetektion

Die Baumdetektion findet in dem segmentierten Bild statt. Beim Durchlaufen einer horizontalen Bildzeile ( $y = \text{konst.}; 0 \leq x \leq S_{max}; S_{max} = \text{Spaltenanzahl im Bild}$ ) werden die Pixel detektiert, bei denen eine Änderung der Farbe (Segmentwechsel) stattfindet. Dabei werden drei Wechselszenarien im segmentierten Bild unterschieden:

- vom Hintergrund (schwarz) zum Objekt (farbig),
- vom Objekt (farbig) zum Hintergrund (schwarz),
- von einem Objekt zum nächsten Objekt (Farbwechsel).

Wird ein Farbwechsel von einem Pixel zum Nächsten detektiert, ist dies ein Zeichen für ein teilweise verdecktes Objekt. In diesem Fall bekommt das Segment mit der größeren Entfernung das Label "verdeckt".

Die Randpixel einer zusammenhängenden Pixelgruppe werden verwendet, um die Durchmesser der Stämme zu bestimmen (Abb. 3). Eine ähnliche Methode wurde in Eysn et al. (2013) präsentiert. Dabei repräsentiert die Horizontaldistanz der Randpunkte  $P_1$  und  $P_2$  im Objektraum den genäherten Stammdurchmesser  $\tilde{d}$  (Gleichung 4):

$$\tilde{d} = \sqrt{(X_{P_1} - X_{P_2})^2 + (Y_{P_1} - Y_{P_2})^2} \quad (4)$$

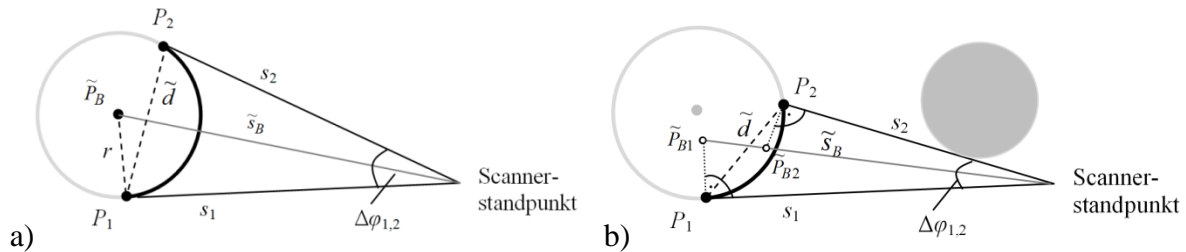


Abb. 3: Bestimmung der Stammdurchmesser im Objektraum; a) bei sichtbarem Stamm; b) bei teilweise verdecktem Stamm.

Potentielle Baumpositionen  $(X_B, Y_B)$  werden berechnet, sobald mindestens zwei zusammengehörige Pixel detektiert werden und die Breite des Objektes einen Mindestdurchmesser  $d_{min}$  im Objektraum überschreitet. Aus der Dreiecksbeziehung in Abb. 3 geht hervor, dass sich die Distanz  $\tilde{s}_B$  (Gleichung 5) zum Baum annähernd aus Distanz  $s_1$  oder  $s_2$  und dem Winkel  $\Delta\varphi_{1,2}$  (Gleichung 6) bestimmen lässt. Um den Einfluss von Verdeckungen gering zu halten, wird immer das Dreieck mit der längsten Distanz ( $s_1$  in Abb. 3b) verwendet.

$$\tilde{s}_B = \frac{s_i}{\cos\left(\frac{\Delta\varphi_{1,2}}{2}\right)} \quad (5)$$

$$\tilde{\varphi}_B = \varphi_1 + \frac{\Delta\varphi_{1,2}}{2} \quad (6)$$

Die Transformation der Polarkoordinaten ( $\tilde{s}_B$ ,  $\tilde{\varphi}_B$ ) in kartesische XY-Koordinaten erfolgt über (Gleichung 7 und 8):

$$X_B = \tilde{s}_B \cdot \cos \tilde{\varphi}_B \quad (7)$$

$$Y_B = \tilde{s}_B \cdot \sin \tilde{\varphi}_B \quad (8)$$

Anschließend werden die Baumpositionen auf die Geländehöhe  $Z_{DGM}$  reduziert, sodass für jeden potentiellen Baumkandidaten 3D-Koordinaten ( $X_B$ ,  $Y_B$ ,  $Z_{DGM}$ ) vorhanden sind.

## 2.4 Registrierung

Die Zuordnung der Baumpositionen aus den beiden Scandatenätzen geschieht über RANSAC (Fischler & Bolles, 1981). Dieses Verfahren ist robust gegenüber Ausreißern und führt eine Schätzung der Transformationsparameter einer 3D-Helmert-Transformation an einer verrauschten Datenmenge inklusive Ausreißern durch. Dazu werden zufällig eine minimale Anzahl an benötigten Datenpunkten iterativ ausgewählt. Im Anschluss werden die Transformationsparameter auf die restlichen Datenpunkte angewendet und analysiert. Sobald ein transformierter Datenpunkt innerhalb einer vorgegebenen Toleranz  $t_{max}$  eines Soll-Datenpunktes liegt, wird ein Zähler inkrementiert. Dieses Vorgehen geschieht wiederholt, und der Transformationsparametersatz mit den meisten Übereinstimmungen in den Datenpunkten wird als korrekte Lösung angesehen. Die übereinstimmenden Datenpunkte beider Scandatenätze gehen als homologe Punkte in die Ausgleichung einer 3D-Helmert-Transformation mit 6 Parametern ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) nach der Methode der kleinsten Quadrate ein.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Studiengebiet und Datensätze

Im Sommer 2008 und Herbst 2011 wurden terrestrische Laserscans in einem Fichtenbestand aufgenommen. Das Messgebiet ist Bestandteil der Ankerstation Tharandter Wald, welche seit 1958 vom Institut für Hydrologie und Meteorologie betrieben wird. Der Fichtenreinbestand wurde 1887 angelegt und hat eine mittlere Bestandhöhe von 31 m und einen mittleren Brusthöhendurchmesser von 36 cm. Weitere Bestandsparameter sind in Grünwald & Bernhofer (2007) aufgeführt.

Zwei Laserscannerstandpunkte aus den Messkampagnen von 2008 und 2011 bilden die Grundlage für die weitere Datenauswertung. Beide wurden mit dem Riegl LMS-Z 420i (Riegl, 2009) und einer Scanauflösung von  $0,12^\circ$  aufgenommen. *Datensatz 1* stammt aus dem Jahr 2008 und deckt einen Scanbereich von  $238^\circ \times 80^\circ$  ab, während der aus 2011 stammende *Datensatz 2*  $192^\circ \times 80^\circ$  abbildet. Beide Standpunkte wurden mit einer Dosenlibelle annähernd horizontal aufgestellt und weisen einen räumlichen Abstand von knapp 25 m auf. Im Jahr 2011 lagen keine weiteren künstlichen Verknüpfungspunkte aus dem Jahr 2008 vor. Die Entfernungsbilder wurden auf einen Entfernungsbereich von  $1 \text{ m} \leq s \leq 30 \text{ m}$  begrenzt (Abb. 4).

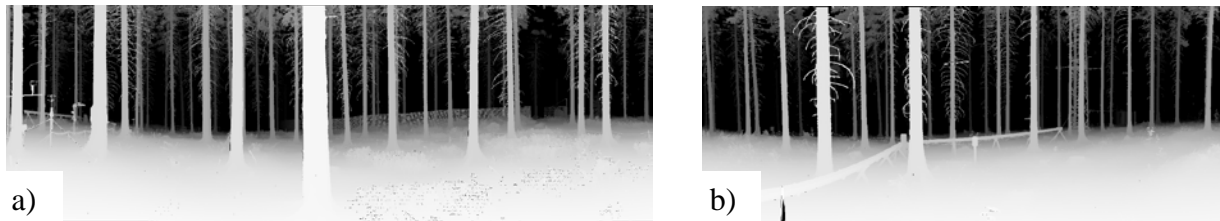


Abb. 4: Entfernungsbilder des a) *Datensatzes 1* und b) *Datensatzes 2*.

### 3.2 Entfernungsbilder

Die Separierung der Bodenpunkte wurde vollautomatisch unter Verwendung der DGM-Punkte ( $s_{DGM} = 0,50$  m), einem Voxelraum mit einer Kantenlänge  $s_{Voxel} = 0,10$  m und einer Strukturelementgröße  $o_N = 3$  durchgeführt. Annähernd 40% der Gesamtpunkte eines Datensatzes wurden als Bodenpunkte erkannt und entfernt. Abb. 5 zeigt die Entfernungsbilder von *Datensatz 1* (1831 px x 589 px) und *Datensatz 2* (1500 px x 612 px) nach der Separierung der Bodenpunkte.

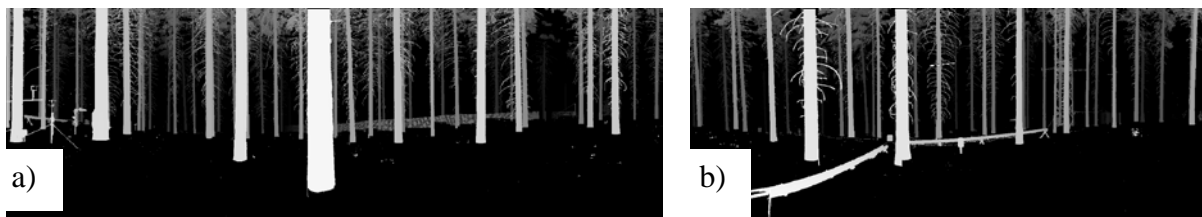


Abb. 5: Entfernungsbilder nach der Separierung der Bodenpunkte von a) *Datensatz 1* und b) *Datensatz 2*.

### 3.3 Segmentierung

Die Segmentierung wurde mit einem 9 px x 9 px großen Strukturelement und einem  $r_{fixed} = 7$  durchgeführt. Das entspricht einem Grenzwertbereich von  $0,7 \text{ cm} \leq \Delta q_{i,j}^{max} \leq 20,3 \text{ cm}$ . Nach erfolgreicher Segmentierung im 3D-Raum mit einer Schwerpunktdistanz  $s_{2D\_SP} = 1,2$  m wurde die Segmentanzahl aus *Datensatz 1* von 1726 auf 274 und aus *Datensatz 2* von 822 auf 193 reduziert (Abb. 6).

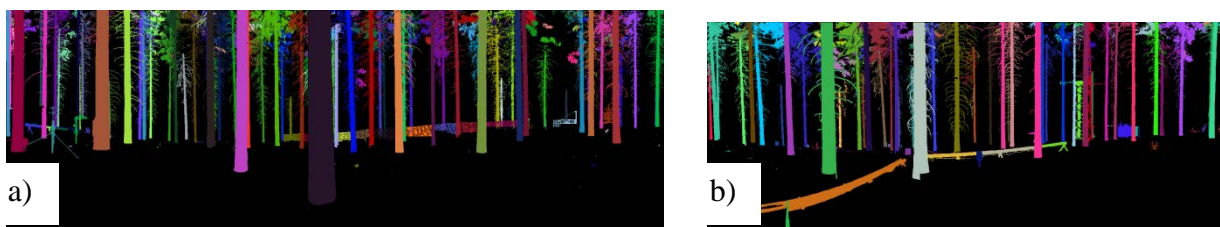


Abb. 6: Segmentierungsergebnis nach der Konnektivitätsanalyse und der 3D-Segmentierung mittels Segmentschwerpunktdistanzen a) *Datensatz 1* und b) *Datensatz 2*.

### 3.4 Baumdetektion und Registrierung

Zur Baumdetektion wurde eine Bildzeile gewählt, die die XY-Ebene im Scannerursprung repräsentiert ( $Z = 0$ ;  $\theta = 90^\circ$ ) und somit den unteren Stammbereich durchläuft. Dies hat aufgrund der vorhandenen Geländeunebenheiten angesichts des annähernd horizontierten Laserscanners im 2D-Bild den Nachteil, dass unterschiedliche Höhen am Stamm zur Baumdetektion verwendet werden. Eine Analyse des DGM zeigt Geländehöhenunterschiede von etwa 4 m. Somit variiert in *Datensatz 1* die Detektionshöhe  $h$  am Stamm zwischen  $0,67 \text{ m} \leq h \leq 2,78 \text{ m}$  und in *Datensatz 2* zwischen  $1,13 \text{ m} \leq h \leq 3,95 \text{ m}$ . Letztendlich wurden in *Datensatz 1* 77 potentielle Baumobjekte (49 sichtbar, 28 teilweise verdeckt) und in *Datensatz 2* 47 Baumobjekte (39 sichtbar, 8 teilweise verdeckt) detektiert. In Abb. 7a sind die detektierten sichtbaren Baumstämme mit blauen Kugeln und die verdeckten Stämme mit roten Kugeln dargestellt. Mit RANSAC wurden die auf das DGM reduzierten Baumpositionen beider Datensätze und einer Toleranz  $t_{max} = 0,60 \text{ m}$  auf Korrespondenzen untersucht. Letztendlich wurden 16 homologe Baumpositionen verwendet und die Transformationsparameter mit einem  $\sigma_0 = 8,8 \text{ cm}$  bestimmt. Visuell waren im Überlappungsbereich 20 homologe Baumpositionen in beiden Datensätzen erkennbar. In Abb. 7b und c) sind die registrierten Punkte einer Fichte dargestellt. Die 2D-Projektion des 90 cm hohen Stammsegments zeigt einen Versatz der Scandaten.

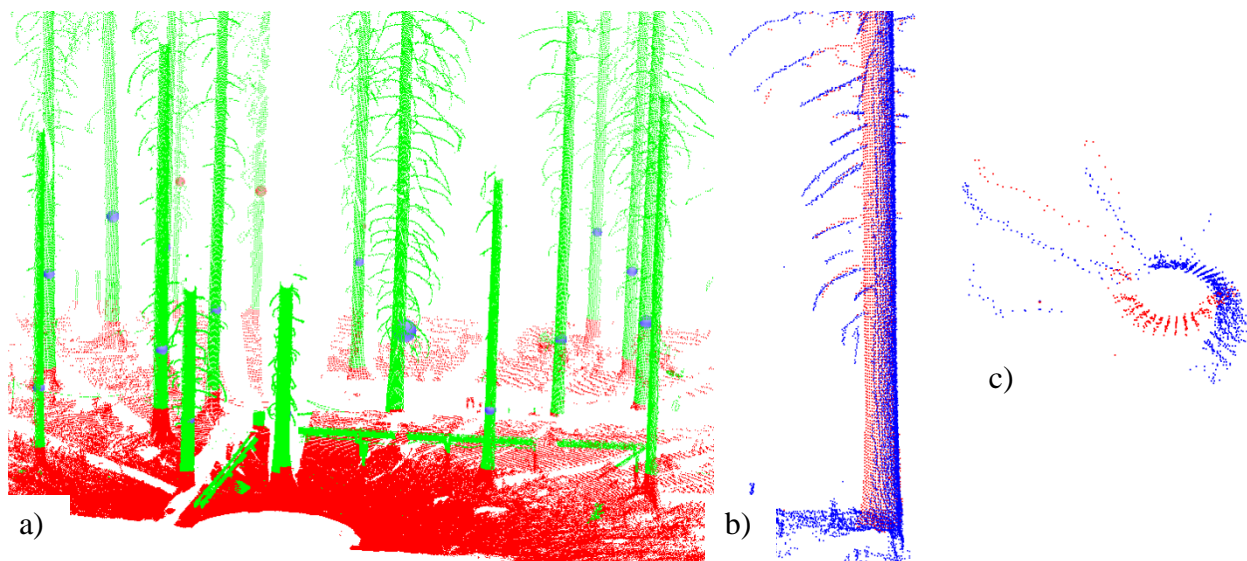


Abb. 7: a) 3D-Punktwolke mit detektierten Stammpositionen in Bildzeilenhöhe (rote Kugeln = teilweise verdeckte Stämme; blaue Kugeln = komplett sichtbar); rot sind die Laserscannerpunkte der zuvor selektierten Bodenpunkte; b) Detaillierte Ansicht auf einen Stamm mit registrierten Daten; c) 2D-Ansicht eines Stammsegments nach automatischer Grobregistrierung (Segmenthöhe 0,90 m).

## 4 Diskussion und Zusammenfassung

Es wurde eine Methode vorgestellt, die eine Grobregistrierung von terrestrischen Laserscannerpunktwolken ohne künstliche Verknüpfungspunkte ermöglicht. Dieses Verfahren ist geeignet für eine nachträgliche Registrierung von Scandaten natürlich gewachsener Bestände wenn keine Verknüpfungspunkte aufgrund unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte vorliegen.



Vorteilhaft ist, dass auch zeitlich veränderte Datensätze (Bestandsveränderungen aufgrund von Ernte und Zuwachs) zur Korrespondenzbestimmung mit RANSAC verwendet werden können. Forstplantagen mit einer Anordnung der Bäume in einem regelmäßigen Raster sind allerdings nicht geeignet.

Ein großes Strukturelement und ein variabler Grenzwert bei der Konnektivitätsanalyse ermöglichen eine stabile Segmentzuordnung im Kronenraum durch Überbrücken von Verdeckungen. Die visuelle Analyse der 3D-Segmente zeigt, dass im Kronenraum kleinere Segmente noch vorhanden sind, die trotz der zweiten Segmentierung über Schwerpunktdistanzen keinem Baumsegment zugeordnet werden konnten.

Der Baumdetektion mit der Durchmesserbestimmung liegt aufgrund der konstanten Bildzeile keine einheitliche Stammhöhe zu Grunde, was eine Reduzierung auf die Geländehöhe erfordert. Aufgrund der zylindrischen Stammform hängt das sichtbare Stammsegment von der Breite des Stammes und der Entfernung zum Scanner ab, was immer zu einem zu klein bestimmten Durchmesser führt. Eine Verbesserung hinsichtlich des Registrierergebnisses würde das Einbeziehen der Stammdurchmesser bzw. die Information der verdeckten Stämme mit sich bringen (Gewichtung in der Ausgleichung). Eine anschließende Feinregistrierung mit Hilfe von ICP der überlappenden Punktbereiche würde das Ergebnis ebenfalls verbessern.

## 5 Danksagung

Die terrestrischen Laserscanneraufnahmen sind im Rahmen des von der DFG geförderten Schwerpunktprogramms 1276 MetStröm „Skalenübergreifende Modellierung in der Strömungsmechanik und Meteorologie“ im Projekt „Turbulente Austauschprozesse zwischen Waldflächen und der Atmosphäre (TurbEFA)“ entstanden. Des Weiteren danken die Autoren Ronald Queck (Institut für Hydrologie und Meteorologie, TU Dresden) und Fabian Schlegel (Institut für Strömungsmechanik, TU Dresden) für die Unterstützung bei der Datenaufnahme.

## 6 Literaturverzeichnis

- BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, G.; MULLOOLY, G. & MOHAN, F., 2006: Application of terrestrial laserscanners for the determination of forest inventory parameters. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36, Part 5.
- BIENERT, A. & SCHNEIDER, D., 2013: Range Image segmentation for Tree detection in forest scans. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Antalya, Turkey, Vol. II-5/W2, pp. 49-54.
- BIENERT, A.; QUECK, R.; SCHMIDT, A.; BERNHOFER, CH. & MAAS, H.-G., 2010: Voxel space analysis of terrestrial laser scans in forests for wind field modelling. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38, Part 5.
- BÖHM, J., 2005: Modellbasierte Segmentierung und Objekterkennung aus Distanzbildern. Dissertation TU Stuttgart, Deutsche Geodätische Kommission, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Heft Nr. 583.
- BUCKSCH, A. & APPEL VAN WAGENINGEN, H., 2006: Skeletonization and segmentation of point clouds using octrees and graph theory. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dresden, Germany, Vol. 36, Part 5.

- DOUILLARD, B.; UNDERWOOD, J.; KUNTZ, N.; VLASKINE, V.; QUADROS, A.; MORTON, P. & FRENKEL, A., 2011: On the Segmentation of 3D LIDAR Point Clouds. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, pp. 2798-2805.
- EYSN, L.; PFEIFER, N.; RESSL, C.; HOLLAUS, M.; GRAFL, A. & MORSDORF, F., 2013: A Practical Approach for Extracting Tree Models in Forest Environments Based on Equirectangular Projections of Terrestrial Laser Scans. *Remote Sensing*, 5, pp. 5424-5448.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, Vol. 24 (6), pp. 381–395.
- GORTE, B.G.H. & PFEIFER, N., 2004: Structuring laser-scanned trees using 3D mathematical morphology. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Turkey, Vol. 35, Part B5, pp. 929–933.
- GRÜNWALD, T. & BERNHOFER, CH., 2007: A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. *Tellus* 59B, pp. 387–396.
- HAALA, N.; REULKE, R.; THIES, M. & ASCHOFF, T., 2004: Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigations in forest applications and tree species recognition. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dresden, Germany, Vol. 34, Part 5/W16.
- HOPKINSON, C.; CHASMER, L.; YOUNG-POW, C. & TREITZ, P., 2004: Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 34, pp. 573–583.
- MAAS, H.-G.; BIENERT, A.; SCHELLER, S. & KEANE, E., 2008: Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laserscanner data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 5, pp. 1579-1593.
- REULKE, R. & HAALA, N., 2005: Tree species recognition with fuzzy texture parameters. In: *Combinatorial Image Analysis*, Springer Verlag Berlin / Heidelberg, pp. 607–620.
- RIEGL, 2009: Long range & high accuracy 3D terrestrial laser scanner system – LMS-Z420i. Data sheet LMS-Z420i. <http://www.riegl.com/> (Stand: 09.12.2009).
- SCHILLING, A.; SCHMIDT, A. & MAAS, H.-G., 2011: Automatic tree detection and diameter estimation in terrestrial laser scanner point clouds. Ed: Wendel, A., Sternig, S., Godec, M., 16th Computer Vision Winter Workshop. Mitterberg, February 2–4, 2011, Austria, pp. 75–82.
- SCHLEGEL, F.; STILLER, J.; BIENERT, A.; MAAS, H.-G.; QUECK, R. & BERNHOFER, CH., 2012: Large-Eddy Simulation of inhomogeneous canopy flows using high resolution terrestrial laser scanning data. *Boundary-Layer Meteorology* 142, pp. 223-243.
- THIES, M. & SPIECKER, H., 2004: Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Freiburg, Germany, Vol. 36, Part 8/W2, pp.192–197.
- VOSSelman, G. & KLEIN, R., 2010: Visualisation and Structuring of Point Clouds. In: *Airborne and terrestrial laser scanning* (Ed: Vosselman, G.; Maas, H.-G.), Whittles Publishing, pp. 45-81.
- WATT, P.J.; DONOGHUE, D.N.M. & DUNFORD, R.W., 2005: Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26 (7), pp. 1437–1446.
- WEZYK, P.; KOZIOL, K.; GLISTA, M. & PIERZCHALSKI, M., 2007: Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory first results from the polish forests. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Espoo, Finland, Vol. 36, Part 3/W52, pp. 424–429.