

Anne Bienert

**Automatische Extraktion von 3D-Baumparametern
aus terrestrischen Laserscannerdaten**

München 2013

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**

Automatische Extraktion von 3D-Baumparametern
aus terrestrischen Laserscannerdaten

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegt der
Fakultät Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Dresden

von

Dipl.-Ing. Anne Bienert

München 2013

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 -1283 / - 1100

e-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Das vorliegende Exemplar entspricht einer leicht überarbeiteten, ergänzten und von den Gutachtern genehmigten Version der Originaldissertation *Automatische Extraktion von 3D-Baumparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten*.

Essenrode, am 01.07.2013

Anne Bienert

1. Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. habil. Hans-Gerd Maas, Technische Universität Dresden
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Norbert Haala, Universität Stuttgart

Tag der Einreichung: 20.07.2011

Tag der Verteidigung: 11.01.2013

© 2013 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet, die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Kurzfassung

Ein großes Anwendungsgebiet des Flugzeuglaserscannings ist in Bereichen der Forstwirtschaft und der Forstwissenschaft zu finden. Die Daten dienen flächendeckend zur Ableitung von digitalen Gelände- und Kronenmodellen, aus denen sich die Baumhöhe ableiten lässt. Aufgrund der Aufnahmerichtung aus der Luft lassen sich spezielle bodennahe Baumparameter wie Stammdurchmesser und Kronenansatzhöhe nur durch Modelle schätzen. Der Einsatz terrestrischer Laserscanner bietet auf Grund der hochauflösenden Datenakquisition eine gute Ergänzung zu den Flugzeuglaserscannerdaten. Inventurrelevante Baumparameter wie Brusthöhendurchmesser und Baumhöhe lassen sich ableiten und eine Verdichtung von digitalen Geländemodellen durch die terrestrisch erfassten Daten vornehmen. Aufgrund der dichten, dreidimensionalen Punktwolken ist ein hoher Dokumentationswert gegeben und eine Automatisierung der Ableitung der Geometrieparameter realisierbar.

Um den vorhandenen Holzvorrat zu kontrollieren und zu bewirtschaften, werden in periodischen Zeitabständen Forstinventuren auf Stichprobenbasis durchgeführt. Geometrische Baumparameter, wie Baumhöhe, Baumposition und Brusthöhendurchmesser, werden gemessen und dokumentiert. Diese herkömmliche Erfassung ist durch einen hohen Arbeits- und Zeitaufwand gekennzeichnet. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit Algorithmen entwickelt, die eine automatische Ableitung der geometrischen Baumparameter aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken ermöglichen. Die Daten haben neben der berührungslosen und lichtunabhängigen Datenaufnahme den Vorteil einer objektiven und schnellen Parameterbestimmung. Letztendlich wurden die Algorithmen in einem Programm zusammengefasst, das neben der Baumdetektion eine Bestimmung der wichtigsten Parameter in einem Schritt realisiert. An Datensätzen von drei verschiedenen Studiengebieten werden die Algorithmen getestet und anhand manuell gewonnener Baumparameter validiert.

Aufgrund der natürlich gewachsenen Vegetationsstruktur sind bei Aufnahmen von einem Standpunkt gerade im Kronenraum Abschattungen vorhanden. Durch geeignete Scankonfigurationen können diese Abschattungen minimiert, allerdings nicht vollständig umgangen werden. Zusätzlich ist der Prozess der Registrierung gerade im Wald mit einem zeitlichen Aufwand verbunden. Die größte Schwierigkeit besteht in der effizienten Verteilung der Verknüpfungspunkte bei dichter Bodenvegetation. Deshalb wird ein Ansatz vorgestellt, der eine Registrierung über die berechneten Mittelpunkte der Brusthöhendurchmesser durchführt. Diese Methode verzichtet auf künstliche Verknüpfungspunkte und setzt Mittelpunkte von identischen Stammabschnitten in beiden Datensätzen voraus. Dennoch ist die größte Unsicherheit in der Z-Komponente der Translation zu finden. Eine Methode unter Verwendung der Lage der Baumachsen sowie mit einem identischen Verknüpfungspunkt führt zu besseren Ergebnissen, da die Datensätze an dem homologen Punkt fixiert werden. Anhand eines Studiengebietes werden die Methoden mit den herkömmlichen Registrierungsverfahren über homologe Punkte verglichen und analysiert. Eine Georeferenzierung von terrestrischen Laserscannerpunktwolken von Waldbeständen ist aufgrund der Signalabschattung der Satellitenpositionierungssysteme nur bedingt und mit geringer Genauigkeit möglich. Deshalb wurde ein Ansatz entwickelt, um Flugzeuglaserscannerdaten mit terrestrischen Punktwolken allein über die Kenntnis der Baumposition und des vorliegenden digitalen Geländemodells zu verknüpfen und zusätzlich das Problem der Georeferenzierung zu lösen.

Dass ein terrestrischer Laserscanner nicht nur für Forstinventuren gewinnbringend eingesetzt werden kann, wird anhand von drei verschiedenen Beispielen beleuchtet. Neben der Ableitung von statischen Verformungsstrukturen an Einzelbäumen werden beispielsweise auch die Daten zur Bestimmung von Vegetationsmodellen auf Basis von Gitterstrukturen (Voxel) zur Simulation von turbulenten Strömungen in und über Waldbeständen eingesetzt. Das aus Laserscannerdaten abgeleitete Höhenbild einer Rinde führt unter Verwendung von Bildverarbeitungsmethoden (Texturanalyse) zur Klassifizierung der Baumart.

Mit dem terrestrischen Laserscanning ist ein interessantes Werkzeug für den Einsatz im Forst gegeben. Bestehende Konzepte der Forstinventur können erweitert werden und es eröffnen sich neue Felder in forstwirtschaftlichen und forstwissenschaftlichen Anwendungen, wie beispielsweise die Nutzung eines Scanners auf einem Harvester während des Erntevorganges. Mit der stetigen Weiterentwicklung der Laserscannertechnik hinsichtlich Gewicht, Reichweite und Geschwindigkeit wird der Einsatz im Forst immer attraktiver.

Abstract

An important application field of airborne laser scanning is forestry and the science of forestry. The captured data serve as an area-wide determination of digital terrain and canopy models, with a derived tree height. Due to the nadir recording direction, near-ground tree parameters, such as diameter at breast height (dbh) and crown base height, are predicted using forest models. High resolution terrestrial laser scanner data complements the airborne laser scanner data. Forest inventory parameters, such as dbh and tree height can be derived directly and digital terrain models are created. As a result of the dense three dimensional point clouds captured, a high level of detail exists, and a high degree of automation of the determination of the parameters is possible.

To control and manage the existing stock of wood, forest inventories are carried out at periodic time intervals, on the base of sample plots. Geometric tree parameters, such as tree height, tree position and dbh are measured and documented. This conventional data acquisition is characterised by a large amount of work and time. Because of this, algorithms are developed to automatically determine geometric tree parameters from terrestrial laser scanner point clouds. The data acquisition enables an objective and fast determination of parameters, remotely, and independent of light conditions. Finally the majority of the algorithms are combined into a single program, allowing tree detection and the determination of relevant parameters in one step. Three different sample plots are used to test the algorithms. Manually measured tree parameters are also used to validate the algorithms.

The natural vegetation structure causes occlusions inside the crown when scanning from one position. These scan shadows can be minimized, though not completely avoided, via an appropriate scan configuration. Additionally the registration process in forest scenes is time-consuming. The largest problem is to find a suitable distribution of tie points when dense ground vegetation exists. Therefore an approach is introduced that allows data registration with the determined centre points of the dbh. The method removes the need for artificial tie points. However, the centre points of identical stem sections in both datasets are assumed. Nevertheless the biggest uncertainty is found in the Z coordinate of the translation. A method using the tree axes and one homologous tie point, which fixes the datasets, shows better results. The methods are compared and analysed with the traditional registration process with tie points, using a single study area. Georeferencing of terrestrial laser scanner data in forest stands is problematic, due to signal shadowing of global navigation satellite systems. Thus an approach was developed to register airborne and terrestrial laser scanner data, taking the tree positions and the available digital terrain model.

With the help of three examples the benefits of applying laser scanning to forest applications is shown. Besides the derivation of static deformation structures of single trees, the data is used to determine vegetation models on the basis of a grid structure (voxel space) for simulation of turbulent flows in and over forest stands. In addition, the derived height image of tree bark using image processing methods (texture analysis) can be used to classify the tree species.

Terrestrial laser scanning is a valuable tool for forest applications. Existing inventory concepts can be enlarged, and new fields in forestry and the science of forestry are established, e. g. the application of scanners on a harvester. Terrestrial laser scanners are becoming increasingly important for forestry applications, caused by continuous technological enhancements that reduce the weight, whilst increasing the range and the data rate.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	11
1.1 Motivation	11
1.2 Laserscanning in forstwirtschaftlichen und forstwissenschaftlichen Fragestellungen	12
1.2.1 Prinzip Laserscanning	12
1.2.2 Flugzeuglaserscanning.....	13
1.2.2.1 Bestandsflächenansätze.....	13
1.2.2.2 Einzelbaumansätze.....	13
1.2.3 Terrestrisches Laserscanning.....	14
1.2.4 Mobiles Laserscanning.....	16
1.3 Zielsetzung der Arbeit.....	18
1.4 Gliederung der Arbeit.....	18
2 Laserscanning	20
2.1 Grundlagen.....	20
2.1.1 Distanzmessverfahren	20
2.1.2 Signalauswertung.....	21
2.1.2.1 Diskrete Laserimpulse.....	21
2.1.2.2 Full-Waveform-Digitisation.....	21
2.1.2.3 Impulsdetektion.....	22
2.1.3 Aufnahmebereich.....	23
2.1.4 Strahlablenkung.....	23
2.1.5 Strahldivergenz	23
2.2 Datenaufnahme.....	24
2.2.1 Aufnahmekonfiguration.....	24
2.2.1.1 Single-Scan.....	24
2.2.1.2 Multiple-Scan.....	25
2.2.2 Verknüpfungspunkte.....	27
2.3 Datennachbearbeitung.....	27
2.3.1 Registrierung.....	28
2.3.1.1 Punktzuordnungen.....	29
2.3.1.2 Helmert-Transformation.....	30
2.3.2 Georeferenzierung.....	31
2.3.2.1 Direkte Georeferenzierung.....	32
2.3.2.2 Indirekte Georeferenzierung.....	32
2.4 Charakteristik der Scannerdaten.....	32
2.4.1 3D-Punktwolken.....	32
2.4.1.1 Amplitudenwerte der Signalstärke.....	33
2.4.1.2 Bilddaten.....	33

2.4.2	Entfernungsbilder.....	34
2.4.3	3D-Datenstrukturen.....	35
2.4.3.1	Nicht-hierarchische Datenstrukturen	35
2.4.3.2	Hierarchische Datenstrukturen.....	37
2.5	Anforderungen an die Datenerfassung.....	37
2.5.1	Hardware.....	37
2.5.1.1	Technische Kenngrößen.....	38
2.5.1.2	Scanausrüstung.....	38
2.5.1.3	Stromversorgung.....	39
2.5.2	Standpunkt.....	39
2.5.3	Wetter.....	39
2.6	Aufgabenspezifische Scannertechnologien in der Holzindustrie.....	40
2.7	Zusammenfassung.....	41
3	Ziele und Methoden der Forstinventur	42
3.1	Forstinventur.....	42
3.1.1	Bundeswaldinventur	42
3.1.2	Inventurverfahren	42
3.2	Methoden zur manuellen Datenerhebung	43
3.2.1	Stammdurchmesser.....	43
3.2.2	Baumhöhe.....	44
3.2.3	Kronenparameter.....	45
3.2.4	Baumposition.....	47
3.2.5	Gelände.....	47
3.3	Messinstrumente im Forst	47
4	Datenerfassung und Messinstrumente	49
4.1	Studiengebiete.....	49
4.1.1	Tharandter Wald	49
4.1.1.1	Buchenbestand.....	50
4.1.1.2	Fichtenbestand.....	50
4.1.2	Wiener Wald.....	52
4.1.2.1	Bestandsbeschreibung.....	52
4.1.2.2	TLS-Datenakquisition.....	52
4.1.3	Tabellarische Gegenüberstellung der Studiengebiete.....	53
4.2	Terrestrische Laserscanner.....	53
4.2.1	Riegl LMS-Z420i.....	53
4.2.2	Faro LS 880.....	54
5	Methoden zur Ableitung forstinventurrelevanter Baumparameter	55
5.1	Vorverarbeitung.....	55
5.2	Digitale Oberflächenmodelle.....	56
5.2.1	Digitales Geländemodell.....	56
5.2.1.1	Filterung.....	56
5.2.1.2	Geländecharakteristik.....	57
5.2.2	Digitales Kronenmodell.....	57

5.3	Baumdetektion.....	58
5.3.1	Segmentierung im Intensitätsbild	59
5.3.2	Segmentierung in Punktwolkschichten.....	59
5.3.2.1	Clustermethode.....	59
5.3.2.2	2D-Hough-Transformation.....	64
5.3.2.3	Baumseparierung	66
5.3.3	Segmentierung im Entfernungsbild.....	66
5.3.4	Segmentierung im Voxelraum.....	68
5.3.5	Segmentierung in der 3D-Punktwolke.....	69
5.4	Stammdurchmesserbestimmung.....	69
5.4.1	Baumfußpunkt.....	70
5.4.2	Interaktive Messung.....	70
5.4.3	Automatische Messung.....	71
5.4.3.1	Ausgleichender Kreis.....	72
5.4.3.2	Ausgleichende Ellipse.....	76
5.4.3.3	Ausgleichender Zylinder.....	77
5.4.3.4	Kreisesehnen.....	79
5.4.3.5	Konvexe Hülle.....	80
5.4.4	Tabellarische Übersicht der Methoden zur Durchmesserbestimmung.....	80
5.5	Bestimmung von Gütekriterien am Stamm.....	81
5.5.1	Inhomogenitäten im Stammquerschnitt.....	81
5.5.2	Schaffform.....	82
5.5.3	Weitere Faktoren.....	82
5.6	Baumhöhenbestimmung.....	82
5.6.1	Differenzverfahren.....	83
5.6.2	Histogrammbasierter Ansatz.....	83
5.7	Kronenparameter.....	83
5.7.1	Kronenansatzhöhe.....	83
5.7.2	Kronenschirmfläche.....	84
5.8	3D-Rekonstruktion von Ästen.....	86
5.8.1	Algorithmus zur Astrekonstruktion.....	86
5.8.2	Skelettierung.....	88
5.9	Software-Paket Autostem ForestTM.....	89
5.10	Fazit.....	91
6	Registrierung von Laserscannerdaten	92
6.1	Terrestrische Scanaufnahmen.....	92
6.1.1	Registrierung über Verknüpfungspunkte.....	92
6.1.1.1	Manuelle Kugeldetektion	92
6.1.1.2	Automatische Kugeldetektion.....	93
6.1.1.3	Punktzuordnung.....	94
6.1.2	Registrierung über Stammpositionen.....	98
6.1.3	Registrierung über Baumachsen.....	99
6.1.4	Registrierung über ICP.....	101
6.1.5	Diskussion.....	101

6.2	Registrierung zwischen terrestrischen Laserscannerdaten und Flugzeuglaserscannerdaten.....	102
6.2.1	Motivation.....	102
6.2.2	Baumdetektion in ALS-Daten.....	103
6.2.2.1	Wasserscheidentransformation.....	103
6.2.2.2	Erweiterte lokale Maximasuche mit Filterung.....	104
6.2.3	Punktzuordnung.....	104
6.2.4	Transformation.....	104
6.2.5	Diskussion.....	105
7	Validierung der Ergebnisse	106
7.1	Ableitung forstinventurrelevanter Baumparameter.....	106
7.1.1	Baumparameter.....	106
7.1.1.1	Baumdetektionen.....	106
7.1.1.2	Baumfußpunkte.....	111
7.1.1.3	Durchmesser.....	112
7.1.1.4	Baumhöhenbestimmung.....	117
7.1.2	Digitales Kronenmodell.....	118
7.1.3	Abschattung.....	119
7.1.4	Reichweite.....	120
7.1.5	Objektbewegung.....	121
7.1.6	Diskussion.....	122
7.2	Registrierung von terrestrischen Laserscannerdaten.....	123
7.2.1	Manuelle Kugeldetektion und Registrierung.....	124
7.2.2	Automatische Kugeldetektion.....	124
7.2.3	Registrierung über BHD	125
7.2.4	Registrierungsverfahren im Vergleich.....	126
7.2.5	Diskussion.....	127
7.3	Kombination von terrestrischen Laserscannerdaten und Flugzeuglaserscannerdaten	128
7.3.1	Baumdetektion.....	128
7.3.1.1	Wasserscheidentransformation.....	128
7.3.1.2	Erweiterte lokale Maximasuche mit Filterung.....	129
7.3.2	Registrierung TLS mit ALS.....	130
7.3.3	Registrierung von Hochstandpunkten.....	131
7.3.4	Inventurparameter aus kombinierten TLS- und ALS-Daten.....	132
7.3.4.1	Baumfußpunkt- und Brusthöhendurchmesserbestimmung.....	133
7.3.4.2	Baumhöhenbestimmung	134
7.3.5	Diskussion.....	135
8	TLS in weiteren forstwissenschaftlichen Anwendungen	137
8.1	Strömungssimulationen an Waldrandkanten.....	137
8.1.1	Parameter zur Beschreibung der 3D-Waldstruktur	137
8.1.2	PAD-Ableitung aus Voxeldaten terrestrischer Laserscannerpunktwolken.....	138
8.1.2.1	Voxelattribute	138
8.1.2.2	Voxelraumanalyse.....	139
8.1.2.3	Reflexionswahrscheinlichkeit.....	140
8.1.3	Auswertung der Ergebnisse.....	141
8.1.4	Fazit.....	143

8.2	Statische und dynamische Verformungsstrukturen an Bäumen.....	144
8.2.1	Schäden an Bäumen.....	144
8.2.2	Experimentaufbau.....	145
8.2.3	Statische Versuche.....	146
8.2.4	Dynamische Versuche.....	147
8.2.5	Tabellarische Gegenüberstellung der eingesetzten Messverfahren.....	149
8.2.6	Fazit	149
8.3	Analyse der Rindenstruktur zur Baumartenerkennung.....	151
8.3.1	Statistische Texturparameter.....	151
8.3.1.1	Bearbeitung der Laserscannerdaten.....	152
8.3.1.2	Grauwertübergangsmatrix.....	152
8.3.1.3	Anwendungsbeispiel.....	153
8.3.2	Texturmerkmale aus Frequenzspektrum.....	155
8.3.3	Fazit.....	155
9	Fazit und Ausblick	157
	Literaturverzeichnis	159
	Abkürzungen	170
	Formelzeichen	172
	Abbildungsverzeichnis	174
	Tabellenverzeichnis	178
	Anhang	179
	Danksagung	190

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ein Laser ist eine monochromatische, stark gebündelte und kohärente Lichtquelle, seine Entwicklung geht auf das Jahr 1960 zurück. Zu seinen ersten Anwendungsbereichen zählten schon damals Fluchtungsmessungen bei Vermessungsarbeiten (Radloff, 2010). Heutzutage ist der Einsatz eines Lasers kaum mehr wegzudenken. In Gebrauchsgütern wie CD- und DVD-Playern, in Laserdruckern, in Bereichen der Medizin- und Kommunikationstechnik sowie in der Vermessung ist die Lasertechnologie weit verbreitet. Messinstrumente auf Basis von Lasertechnik zählen heute zum Standard. Als schnelles und berührungsloses Messverfahren hat sich das Laserscanning etabliert. Die dreidimensionale Datenerfassung komplexer Objektgeometrien ist Gegenstand vieler Anwendungsbereiche wie Architektur, Archäologie, Facility Management, Industrievermessung und Qualitätskontrolle sowie Medizin und bildet die Grundlage weiterer Planungen und Auswertungen. Über die kontinuierliche Distanzmessung einzelner Oberflächenpunkte wird das Verfahren sowohl von Flugzeugplattformen aus (Flugzeuglaserscanning) als auch vom Boden aus praktiziert. Am Boden kommen statische oder bewegte bodennahe Plattformen zum Einsatz.

Ein großes Anwendungsgebiet des Flugzeuglaserscannings (engl. *airborne laser scanning* – ALS) ist in Bereichen der Forstwirtschaft und Forstwissenschaft zu finden (Maas, 2005). Die Daten dienen flächendeckend zur Ableitung von digitalen Gelände- und Kronenmodellen, aus denen sich die Baumhöhe ableiten lässt. Aufgrund der Aufnahme- richtung aus der Luft lassen sich spezielle (bodennahe) Baumparameter wie Stammdurchmesser und Kronenansatzhöhe nur durch Modelle schätzen. Der Einsatz terrestrischer Laserscanner bietet auf Grundlage der hochauflösenden Datenakquise eine gute Ergänzung zu den ALS-Daten. Inventurrelevante Baumparameter wie Brusthöhendurchmesser (BHD) und Baumhöhe lassen sich ableiten und eine Verdichtung von digitalen Geländemodellen durch terrestrisch erfasste Daten ist erreichbar. Aufgrund der dichten dreidimensionalen Punktwolken ist ein hoher Dokumentationswert gegeben und eine Automatisierung der Ableitung der Geometrieparameter realisierbar. Solch eine Automatisierung führt zu einer effizienteren Bestimmung von Inventurparametern hinsichtlich des Zeit- und Messaufwands im Forst. Das Laserscanning ist im Vergleich zur manuellen Datenerfassung durch eine:

- schnelle,
- detailgenaue und hochauflösende,
- flächendeckende,
- objektive,
- in Echtzeit durchgeführte,
- mit hohem Dokumentationswert versehene

Datenaufnahme gekennzeichnet.

Die Anfänge der Forstinventur reichen bis in das 14. Jahrhundert zurück. Mit dem damaligen enormen Holzverbrauch für das Betreiben von Salinen und Bergwerken war eine Holzknappheit vorprogrammiert. Durch gezielte Planungen und damalige Kontrollen in Form von „Waldbereitungen“ wurde der Holznot entgegengewirkt (Zöhrer, 1980). Heute sind knapp 30 % (10,7 Mio. ha) des deutschen Staatsgebietes mit Wald bedeckt (BWI, 2005). Um den vorhandenen Holzvorrat zu kontrollieren und zu bewirtschaften, werden in periodischen Zeitabständen auf Stichprobenbasis Forstinventuren durchgeführt. Geometrische Baumparameter, wie Baumhöhe, Baumposition und BHD, werden gemessen und dokumentiert. Diese Datenerhebung ist durch einen hohen Arbeits- und Zeitaufwand gekennzeichnet. Während in den Anfängen Forstinventuren auf verhältnismäßig kleinen Gebieten durchgeführt wurden, startete mit Entwicklung der Luftbildaufnahmen, am Anfang des letzten Jahrhunderts, eine Ära der großflächigen Forstinventuren (Zöhrer, 1980). Neben den manuellen Datenerhebungsmethoden sind Luft- und Satellitenbilder sowie Flugzeuglaserscannerdaten in der heutigen Zeit essentiell und nicht mehr wegzudenken. Die aus der Luft gewonnenen Daten ermöglichen eine flächendeckende, automatisierte Ableitung von Bestandshöhen, Baumartenklassifizierung und Erfassung der Geländeeigenschaften und komplementieren somit die stichprobenartig aufgenommenen Bodendaten. Im Gegenzug dazu stellt das terrestrische Laserscanning eine objektive Methode dar, die manuell erfassten Baumparameter

zu ersetzen. Aus einer Laserscannerpunktwolke können über geeignete Verfahren die wichtigsten Bauparameter automatisch und mit hoher Genauigkeit abgeleitet werden.

1.2 Laserscanning in forstwirtschaftlichen und forstwissenschaftlichen Fragestellungen

1.2.1 Prinzip Laserscanning

Das Laserscanning ist ein sequentielles, dreidimensionales Messverfahren, das sich durch eine kontinuierliche Punktmessung auszeichnet. Über Ablenkmechanismen werden Laserimpulse ausgesendet und Objektoberflächen dreidimensional (3D) abgetastet. Ausgehend von den verschiedenen Plattformen, von denen das Laserscanning praktiziert wird, wird, wie bereits erwähnt, in Flugzeuglaserscanning, in terrestrisches Laserscanning (TLS) und kinematisches Laserscanning (engl. *mobile laser scanning* – MLS) unterschieden (Abbildung 1.1).

Beim Flugzeuglaserscanning werden die Laserimpulse durch die Bewegung des Flugzeuges und einen Ablenkmechanismus quer zur Flugrichtung über die Geländeoberfläche verteilt. Synchronisierte Positions- und Orientierungsmessungen über globale Satellitenpositionierungssysteme (z. B. GPS) und inertielle Navigationssysteme (INS) referenzieren die in Bewegung befindliche Flugzeugplattform (Kraus, 2004). Aus der Laufzeitmessung eines reflektierten Impulses wird die Entfernung bestimmt, um dann aus den Polarkoordinaten kartesische Koordinaten (X , Y , Z) zu bestimmen. Während beim ALS die räumliche Verteilung des Laserimpulses über die bewegte Plattform realisiert wird, sorgt beim TLS oftmals ein Motor für die horizontale Ablenkung. Auch hier wird neben der gemessenen Streckeninformation simultan der Horizontal- und Vertikalwinkel abgegriffen und über polares Anhängen werden 3D-Koordinaten bestimmt. Solange keine gerichtete Reflektion (Spiegelung an glatten Flächen) stattfindet, reflektieren raue Objektoberflächen diffus (Lambert'scher Strahler) (Wagner et al., 2003). Aus dem Bruchteil der reflektierten Strahlung und der ausgesendeten Energie des Laserimpulses wird für jeden Punkt eine Intensität bestimmt. Das Ergebnis sind Laserscans, sogenannte Punktwolken, mit mehreren Millionen 3D-Einzelpunkten, unter Berücksichtigung der Intensität auch als 4D-Punktwolken bezeichnet (Staiger, 2003). Das MLS unterscheidet sich vom TLS hinsichtlich der kinematischen Aufnahmeplattform. Aufgrund der Bewegung sind hier ebenfalls Positions- und Orientierungsmessungen zur Referenzierung notwendig.

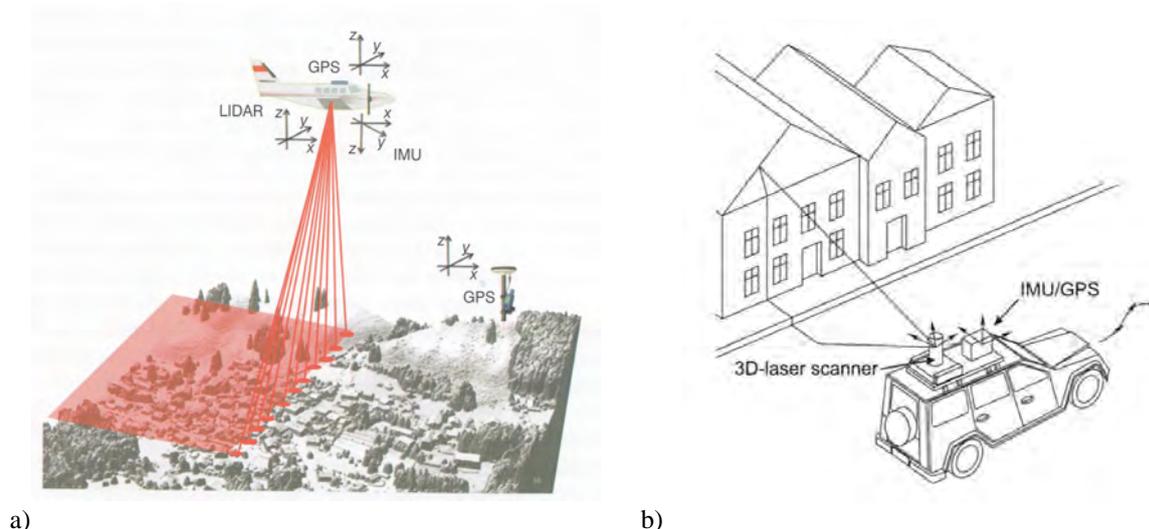


Abbildung 1.1: Prinzip des a) Flugzeuglaserscannings (Beraldin et al., 2010) und b) des Mobile Laserscannings (Rieger et al., 2010).

Die gewonnenen Datensätze von ALS, TLS und MLS unterscheiden sich hinsichtlich der Aufnahmerichtung, des Aufnahmebereiches, der Datenrate und der Dichte der Laserscannerpunkte. Während TLS und MLS zu den vergleichsweise jüngeren Verfahren gehören, war das ALS der erste Vertreter dieser abtastenden Messverfahren. Seit

zunehmend 15 Jahren wird das Flugzeuglaserscanning zur Oberflächenerfassung großer Gebiete eingesetzt. Aufgrund der schnellen, flächendeckenden 3D-Aufnahme großer Gebiete wuchs das Interesse am ALS zur Bewältigung forstwirtschaftlicher Aufgaben rasch, während das Interesse an TLS sowie MLS erst seit den letzten fünf Jahren geweckt ist. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten des Laserscannings im Forst.

1.2.2 Flugzeuglaserscanning

Zu den klassischen Anwendungsbereichen des ALS im Forst gehört die Bestimmung eines digitalen Geländemodells (DGM). Verschiedene Studien haben gezeigt, dass je nach Bestandsart, -dichte und Jahreszeit 20 – 65 % der ausgesendeten Laserimpulse bis zum Waldboden durchdringen (Hoss, 1997; Wever, 2002). Aus den Bodenpunkten wird dann über Filtermethoden ein DGM abgeleitet (u. a. Kraus & Pfeifer, 1998; Kraus & Pfeifer, 2002; Vosselman, 2000). Die Unterscheidung in mehrere reflektierte Impulse ermöglicht die Erfassung des Kronendaches. Der erste Impuls, der in der Empfangseinheit registriert wird, repräsentiert bei bewaldetem Gebiet im besten Fall die Baumspitze. Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick der Möglichkeiten der ALS-Anwendung im Forst, dabei werden die Ansätze in Bestandsflächen- und Einzelbaumansätze eingeteilt. Eine umfangreiche Zusammenstellung der ALS-Anwendungen im Wald wird in Maas (2010) gegeben.

1.2.2.1 Bestandsflächenansätze

Ein wichtiger Baumparameter ist die Baumhöhe, die oftmals als Eingangsparameter für weitere Forstberechnungen Verwendung findet. Die Baumhöhe ist direkt aus den Laserdaten ableitbar und bildet den Schwerpunkt vieler vergangener Arbeiten (u. a. Næsset, 1997b; Andersen et al., 2005). Über Oberflächenmodelle, die die Kronenstruktur wiedergeben (digitale Kronenmodelle – DKM) kann durch Subtraktion des DGM die mittlere Bestandshöhe bestimmt werden. Erste Tests, die Methoden der arithmetischen Mittelbildung verwenden, werden in Næsset (1997a) vorgestellt.

Durch Verwendung der Baumhöhe in Formzahl- und Volumenfunktionen ist die Ableitung der oberirdischen und sogar unterirdischen Biomasse möglich (Næsset, 2004; Jochem et al., 2010). Næsset (2004) präsentiert Ergebnisse von 143 Probestellen, die zu 92 % mit der oberirdischen Biomasse und zu 86 % mit der unterirdischen Wurzelbiomasse korreliert sind. Die Volumenrekonstruktion der vertikalen Bestandsschicht kann mit vergleichsweise neueren Instrumenten, die das gesamte Intensitätssignal der reflektierten Energie aufzeichnen und digitalisieren, durchgeführt werden. Solche Full-Waveform-Scanner bringen eine Genauigkeitssteigerung hinsichtlich der Biomasseabschätzung, für die von Drake et al. (2002) eine Korrelation von 93 % mit manuell erfassten Felddaten dokumentiert wird. Die Analyse zeitlich getrennter Datensätze unterschiedlicher Befliegungen gibt Aufschluss über die Veränderungen der Waldstruktur. So können der Biomassezuwachs durch Wachstum (Yu et al., 2005), aber auch großflächige negative Veränderungen durch Holzeinschlag (Yu et al., 2004), Insektenbefall oder Sturm detektiert werden. Flugzeuglaserscannerdaten unterstützen die Modellierung des Waldbrandverhaltens, sie helfen somit, durch einen rechtzeitigen Einsatz von Präventivmaßnahmen Schäden vorzubeugen (Andersen et al., 2005).

Aus der Biomasse lässt sich indirekt auf die Speicherung von Kohlenstoff schließen (Stephens et al., 2007). Die Verteilung von Spurengasen wie Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre ist neben der Topographie auch von der Vegetationsstruktur abhängig und wird in Chasmer et al. (2007) anhand der aus ALS-Daten bestimmten Kronenstruktur präsentiert.

1.2.2.2 Einzelbaumansätze

Die Einzelbaumerkennung aus flugzeuggestützten Laserscannerdaten ist ein grundlegendes Verfahren in forstwirtschaftlichen Einsatzgebieten. Zur Segmentierung der Baumkrone wird häufig ein modifizierter Watershed-Algorithmus eingesetzt (Zhao & Popescu, 2007; Rossmann et al., 2007; Chen et al., 2006; Jing et al., 2010). Ein weiterer Ansatz ist der Pouring-Algorithmus (Diedershagen et al., 2003; Koch et al., 2006). Dieser gibt eine gute Näherung der Baumkrone und breitet sich vom lokalen Maximum in Richtung der Täler aus. Eine Genauigkeitssteigerung bringt die Kombination dieser Verfahren mit Informationen der Charakteristik des Bestandes. So werden Baumkronendurchmesser, mittlere Baumabstände und Baumhöhen verwendet (Popescu & Wynne, 2004; Chen et al., 2006; Diedershagen et al., 2003; Koch et al., 2006), um die Detektionsrate zu optimieren.

Während sich die bisher genannten Verfahren größtenteils auf gerasterte Kronenmodelle beziehen, verwenden Tiede et al. (2005) die Punktwolke selbst. Die lokale Maximumsuche der Baumkronen basiert auf einem Algorithmus mit dynamischem Suchradius, der abhängig von der Baumhöhe ist. Die anschließende Baumkronendelinierung erfolgt mit einer Regionenexpansion (engl. *region growing*). Falkowski et al. (2006) verwenden zur Baumdetektion, Baumhöhen- und Kronendurchmesserbestimmung eine Technik, die auf der Spatial-Wavelet-Analyse basiert. Wang et al. (2008) präsentiert die 3D-Einzelbaummodellierung aus ALS-Daten auf Basis regelmäßiger Gitterstrukturen (Voxeldaten). Eine Gegenüberstellung und Validierung an unterschiedlichen Testgebieten von sechs verschiedenen Baumdetektionsalgorithmen wird in Vauhkonen et al. (2010) präsentiert. Rahman & Gorte (2009) verwenden ALS-Daten mit 70 Pkt/m² in einem dichte-basierten Ansatz, der den Abfall der Kronenform von der Kronenmitte zum Kronenrand hin detektiert. Reitberger et al. (2007) präsentieren einen neuen Algorithmus, basierend auf Full-Waveform-Daten, der über die Stammdetektion hinaus die Baumpunkte segmentiert.

Analysen der Kronenform und des Kronenansatzes ermöglichen die Klassifikation hinsichtlich der Baumarten. Eine prinzipielle Unterscheidung in Laub- und Nadelbäume wird in Liang et al. (2007) vorgestellt. Als Datengrundlage werden First- und Last-Pulse-Echos laubfreier Bestände verwendet, die zu 89 % richtig klassifizierten Bäumen führen. Holmgren & Persson (2004) klassifizieren in Fichten und Kiefern anhand acht berechneter Klassifikationsparameter aus zuvor segmentierten Baumclustern in Fichten und Kiefern. Sie erreichen dabei eine Übereinstimmung von 95 %. Die Kombination mit hochauflösenden NIR-Luftbildern (NIR – nahes Infrarot) verspricht zuverlässigere Klassifikationsergebnisse, sie lieferte allerdings in einer Studie von Persson et al. (2004) mit einer ähnlichen Anzahl an Testbäumen wie Holmgren & Persson (2004) nur 90 % korrekt klassifizierte Bäume.

1.2.3 Terrestrisches Laserscanning

Seit nicht ganz einem Jahrzehnt gibt es Untersuchungen und Arbeiten zum TLS im Wald. Wie in den folgenden Kapiteln noch gezeigt wird, stellt der Wald als Messobjekt einige Anforderungen an das TLS, die mit Vor- und Nachteilen verbunden sind. In Thies et al. (2003) werden neben den Vor- und Nachteilen des TLS im Forst die zwei möglichen Aufnahmekonfigurationen (Single-Scan-Aufnahmen, Multiple-Scan-Aufnahmen) vorgestellt. Weiß (2009) geht einen Schritt weiter und untersucht die verschiedenen Varianten der Positionsanordnung, um die bestmögliche Scankonfiguration im Forst auszumachen.

Eine sich ableitende Grundaufgabe aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken im Forst ist die Detektion von Baumstämmen. Während beim ALS die Bäume über die Baumkronen detektiert werden, ist aufgrund der bodennahen Aufnahme-position die Detektion der Baumstämmen zielführender. Ein geläufiges Verfahren ist das Suchen von Punkten mit Clusteralgorithmen innerhalb einer horizontalen Punktwolkenschicht. Über die (halb-)kreisförmige Punktanordnung werden erfolgreich Baumstämmen extrahiert (u. a. Simonse et al., 2003; Aschoff et al., 2004; Aschoff & Spiecker 2004; Király & Brolly, 2007). Darauf aufbauend bilden die forstinventurrelevanten Parameter einen weiteren Schwerpunkt. Dabei stehen die zwei wichtigsten Geometrieparameter, der Brusthöhendurchmesser (mit weiteren Durchmessern entlang des Stammes) und die Baumhöhe, im Fokus der Untersuchungen (u. a. Watt et al., 2005; Wezyk et al., 2007; Hopkinson et al., 2004; Pál, 2008). Thies & Spiecker (2004) präsentieren eine Detektionsrate von 52 % aller Bäume in einer Multiple-Scan-Aufnahme und im Gegensatz dazu eine nur 22%ige Detektionsrate in Single-Scans. Im Anschluss daran wird die Durchmesserbestimmung über das Einpassen von ausgleichenden Kreisen und Ellipsen realisiert. Aschoff et al. (2004) präsentieren Standardabweichungen der Durchmesserbestimmung von 2,83 cm bei der Anwendung des ausgleichenden Kreises und von 4,03 cm bei ausgleichenden Ellipsen. Dabei werden Prozessierungszeiten von mehreren Stunden angegeben (Aschoff & Spiecker, 2004).

Nicht nur die geometrische Beschaffenheit der Vegetation, sondern auch die Qualitätsbestimmung zur Schätzung der Holzqualität ist mittels TLS denkbar. Mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden wird aus den Intensitäts- und Entfernungsbildern eines Laserscans von detektierten äußeren Holzfehlern auf die innere Holzqualität geschlossen (Schütt et al., 2005; Thomas et al., 2006).

Reulke & Haala (2005) verwenden die Scandaten zur Identifikation der Baumstämmen und überlagern diese Information mit RGB-Daten einer Panoramakamera. Die Texturparameter der Bildinformation lassen Rückschlüsse auf die Baumart zu. Ferner kann das Höhenbild der auf einen Zylinder abgewickelten Laserscannerpunkte eines Stammes

zur Baumartenbestimmung verwendet werden. Dies hat den Vorteil der Beleuchtungsunabhängigkeit (Kretzschmar, 2009).

Die Stabilität eines Baumes ist von der Ausprägung und Verankerung der Wurzel, von den äußeren Einflüssen wie Bodenbeschaffenheit und von mechanischen Einflüssen, wie der Verteilung von Lasten (Schneedruck und Wind), abhängig. Neben der aufwendigen Freilegung der Wurzel an stehenden Bäumen mit speziellen Geräten war in der Vergangenheit die dreidimensionale Erfassung der Wurzel mit großem Aufwand und mit Schwierigkeiten verbunden (Gärtner, 2004). Der Einsatz terrestrischer Laserscanner ermöglicht eine dreidimensionale Analyse des Wurzelsystems in kurzer Zeit (Teobaldelli et al., 2007; Gärtner & Denier, 2006). Aussagen über die Wurzelbiomasse, die Ausbreitung und den architektonischen Aufbau der Wurzel sowie die Lastgeschichte eines Baumes, welche sich in der Verteilung der Jahresringbreiten der Wurzel widerspiegelt, können abgeleitet werden.

Aschoff et al. (2006) untersuchten die Jagdlebensräume der Fledermäuse mit Hilfe eines terrestrischen Laserscanners. Die räumliche Anordnung der Bäume sowie die Ausbildung der Vegetationsschichten wurden dreidimensional erfasst. Durch Transformation der Laserscannerpunkte in einen Voxelaum ist der offene Flugraum modellierbar. Die Analyse von Horizontal- und Vertikalschnitten hinsichtlich des artspezifischen Abstandverhaltens der Fledermäuse führt zur Ableitung von Flugkorridoren. Einen ähnlichen Ansatz haben Michel et al. (2008) publiziert. Unter Verwendung von terrestrischen Laserscannerpunktwolken wurden die Nistplätze zweier Vogelarten in Neuseeland anhand der vertikalen Vegetationsstruktur analysiert.

Neben meteorologischen Effekten (wie Trockenperioden, hohe Lufttemperaturen und geringe relative Luftfeuchtigkeit) steigern auch zunehmende Bodenvegetation und Totholz die Waldbrandgefahr. Loudermilk et al. (2007) untersuchten die Laserscannerpunktwolken ausgesuchter Bodenbereiche hinsichtlich der Bodenvegetationshöhe. Die Art der Bodenvegetation wird über die Punktdichte der Laserscannerpunkte innerhalb eines Voxelaumes abgeleitet und in verschiedene Brennstoffklassen eingeteilt. Über die Klassifizierung der verschiedenen Vegetationsarten in Brennstoffklassen ist das Brandverhalten des Bestandes modellierbar.

Skelettierungen mit der Extraktion der Aststruktur sowie der Topologiebestimmung werden über Octreeansätze und Graphentheorien aus den Punktwolken realisiert (z. B. Gorte & Pfeifer, 2004; Bucksch & Wageningen, 2006; Bucksch et al., 2009a). Parameter wie die Größe der Kronendachlücken (z. B. Danson et al., 2007), die einen entscheidenden Beitrag zur Bestimmung des Blattflächenindex (engl. *leaf area index* – LAI) liefern, sind ebenfalls Resultate der Punktwolkenanalyse. Analysen zeigen vergleichbare Ergebnisse der detektierten Kronendachlücken aus hemisphärischen Bildern. Der LAI selber ist durch diese indirekte Methode ebenfalls ableitbar (Jupp et al., 2008; Henning & Radtke, 2006b) und ist als zerstörungsfreie Bestimmungsmethode ein alternatives Messverfahren. Algorithmen zur Bestimmung weiterer Kronenparameter, wie Kronenhülle, Blattfläche und Biomasseverteilung der Blätter innerhalb einer Krone, sind in Pretzsch et al. (2011) vorgestellt.

Die aufgezeigten Einsatzgebiete gliedern sich in Einzelbaumansätze und Bestandsansätze und sind in Abbildung 1.2 noch einmal grafisch dargestellt.

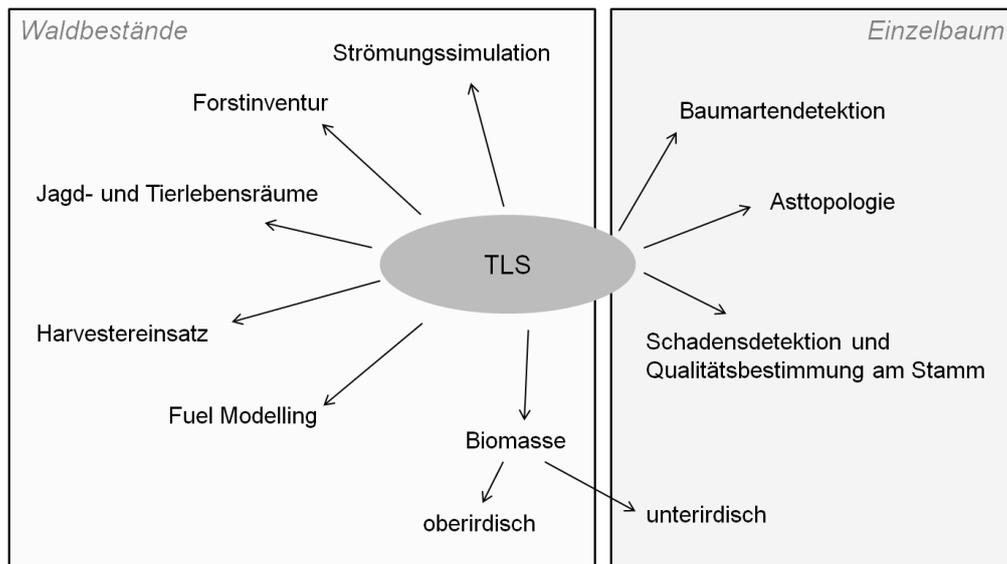


Abbildung 1.2: Übersicht der Einsatzgebiete von terrestrischen Laserscannern im Forst.

1.2.4 Mobiles Laserscanning

Eine Erweiterung des terrestrischen Laserscannings ist das mobile Laserscanning. Diese kinematische Methode des terrestrischen Laserscannings hat aufgrund des mobilen Standortwechsels ohne Auf- und Abbau der Instrumente den Vorteil einer schnelleren und somit effizienteren Datenerfassung großer Objekte. Das System besteht, ähnlich dem ALS, aus einem oder mehreren terrestrischen Laserscannern und einem Ortungs- und Positionierungssystem (GPS und INS) und ist auf einer mobilen Plattform befestigt. Alternativ zu dem kostenintensiven INS können Inkrementalgeber, die Lage- und Richtungsänderungen aufzeichnen, eingesetzt werden. Je nach Anwendungsgebiet kommen als mobile Plattformen infrage:

- Kraftfahrzeuge zur Detektion von z. B. Straßenzügen und -bäumen für 3D-Stadtmodelle (Rutzinger et al., 2010),
- schienengeführte Plattformen (Zug- und Spurwagen), z. B. zur Tunnelvermessung (Mettenleiter et al., 2008),
- Schiffe zur Hafен- und Küstenerfassung (Rieger et al., 2008)
- und autonome Fahrzeuge bzw. Roboter, z. B. bei Harvestersystemen (Ziegler et al., 2010).

Zwei Aufnahmemethoden werden unterschieden, zum einen die Stop-and-go-Methode und zum anderen die On-the-fly-Methode. Bei der Stop-and-go-Methode wird von einer bewegten Plattform aus im statischen Zustand gescannt und erst nach erfolgter Aufnahme die Plattform bewegt. Eingesetzt werden hierfür 3D-Laserscanner. Die On-the-fly-Methode erfasst während der Plattformbewegung mit Hilfe von 2D-Laserscannern die Umgebung. Die Verwendung von 3D-Laserscannern ist ebenfalls möglich, allerdings wird hier noch zusätzlich die Rotation um die Z-Achse fixiert, sodass ein vertikaler Profilscan orthogonal zur Bewegungsrichtung durchgeführt wird. Aufgrund der bewegten Plattform während des Scanvorganges ist zur Registrierung der Daten ein hochpräziser Zeitstempel Voraussetzung. Zu jedem Punkt werden die GPS- und INS-Daten erfasst, über die eine Registrierung in ein übergeordnetes System erfolgt. Ein Überblick über die zwei prinzipiellen Aufnahmemethoden sowie deren Einsatzbereiche ist in (Kutterer, 2010) gegeben.

Im Folgenden werden einige Beispiele für das MLS im Forst aufgeführt. Die Laserscanner werden bei der On-the-fly-Methode horizontal anstatt vertikal, wie bei standardmäßigen Anwendungen des MLS üblich, zur Bewegungsebene ausgerichtet. Diese Ausrichtung ermöglicht die Detektion von Hindernissen wie stehenden Bäumen und Sträuchern und lässt zum einen eine autonome Fortbewegung im Forst zu. Zum anderen werden die Erntevorgänge mit Informationen von Baumposition und Stammdurchmesser unterstützt und beschleunigt. Da die Steuerung von Harvestern eine nicht triviale Aufgabe ist und einer langen und preisintensiven Ausbildung bedarf, ist eine (semi-)automatische Steuerung vom Vorteil. Hellström et al. (2009) unterscheiden hinsichtlich der Automation der Vorgänge in drei Szenarien: in einen

vom Operator ferngesteuerten Prozess; in eine semiautomatische Steuerung mit der Option des Eingriffs des Operators; in einen vollkommen autonomen Prozess. Mit der zunehmenden Automation ist die Steigerung der Produktivität, die Kostenersparnis und die Reduktion von umweltschädlichen Einflüssen verbunden, da Automationsprozesse objektiver, schneller und kontinuierlicher durchgeführt werden.

Die Ausstattung von Erntemaschinen (Harvestern) mit bildgebenden Sensoren ermöglicht ein autonomes und effizienteres Arbeiten auf den Rückegassen¹ während des Erntevorganges. Die Harvester können die Bäume detektieren, vermessen und gezielt mit den Greifarmen anfahren, um sie dann zu ernten. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „DynaWIS“ wird eine dynamische Waldinventur durch Kombination von optischen Sensoren mit Harvestern angestrebt (Dynawis, 2011). Ausgestattet mit einem 2D-Laserscanner und einer Kamera wird eine Online-Lösung angestrebt, um während des Vorrückens die Bäume in den Laserdaten zu detektieren und den BHD mit Baumfußpunkt aus den Kameradaten zu berechnen (Ziegler et al., 2010). Zur Spureinhaltung der Erntemaschinen kann ebenfalls ein Laserscanner eingesetzt werden. Die Verdichtung des Waldbodens ist somit auf die Spurweite begrenzt und Schädigungen an Bäumen und Boden werden gering gehalten (Schneider et al., 2011).

Zur Georeferenzierung der Daten sind die mobilen Plattformen mit GPS-Empfängern ausgestattet. Allerdings ist aufgrund der dichten Baumkronen im Wald mit Signalverlusten zu rechnen. Eine Methode zur globalen Orientierung der lokalen Baumpositionen ist in Rossmann et al. (2010) gegeben. Durch Verwendung von Baumverteilungsplänen im globalen Referenzsystem, abgeleitet aus ALS-Daten und Orthophotos, werden die lokalen Baumpositionen georeferenziert.

Seit Entwicklung der Lasermessungen ist im Bereich der Robotik die autonome Navigation ein aktueller Forschungsschwerpunkt. Bereits im Jahre 1986 berichten Olivier & Ozguner (1986) von einem mit einem Laserdistanzmesser ausgestatteten Kraftfahrzeug zur Hinderniserkennung. Bei der autonomen Navigation in bewaldeten Gebieten spielen die Detektion des Geländes sowie die Unterscheidung von harten (Baumstämme) und weichen Hindernissen (Blätter, Sträucher) eine entscheidende Rolle bei der Fortbewegung. Durch Analysen der aufgenommenen Punktwolken hinsichtlich der Punktverteilung einzelner Punktcluster mit Hilfe von Eigensystemen können Objekte in Boden, Strauch und Baum klassifiziert werden (z. B.: Hebert & Vandapel, 2003; Lalonde et al., 2006). Bradley et al. (2004) nutzen die Kombination aus dem roten Kanal der Kamera und den Intensitäten der reflektierten Laserimpulse eines NIR-Lasers, um über den Vegetationsindex NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) chlorophyllhaltige Vegetationselemente zu detektieren.

Loudermilk et al. (2007) verwenden einen 3D-Laserscanner in der Stop-and-go-Methode. Der Scanner ist an einem vertikalen Ausleger auf der Ladefläche eines Geländewagens montiert. Dies ermöglicht zum einen einen schnellen Standpunktwechsel im Wald und zum anderen einen besseren Einfallswinkel der Laserimpulse auf das angrenzende Gelände. Eine noch flexiblere Lösung hinsichtlich der Wendigkeit und Robustheit auf Waldboden ist ein ATV-Quad (All Terrain Vehicle Quad). Jutila et al. (2007) präsentieren ein ATV mit einem 2D- und 3D-Laserscanner zur Detektion von Bäumen im Forst.

Rutzinger et al. (2010) nutzen MLS-Daten von Straßenzügen zur Baummodellierung für 3D-Stadtmodelle. Über den Stammdurchmesser und die Rekonstruktion der äußeren Hülle, aus der die Kronenform mit Durchmesser, Höhe und Kronenansatzhöhe ableitbar ist, wird das Astwerk modelliert. Diese Anwendung stellt mehr Ansprüche an die visuelle Gestaltung, weniger an die exakte Nachbildung der Äste.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist im Bereich des Obstanbaus zu sehen und soll hier nur kurz erwähnt werden. Walklate et al. (2002) nutzen 3D-Punktwolken zur Berechnung von Zerstäuber-Volumenmodellen, um Pflanzenschutzmittel in Apfelbaumplantagen gezielt einzusetzen. Die Messausrüstung, bestehend aus einem Traktor mit einem Pestizid-Zerstäuber und einem Laserscanner, ist auf eine Vegetationsmessung im lokalen Koordinatensystem des Traktors ausgerichtet. Daraus ableiten lassen sich zusätzlich die Sprühstärke und die Sprührichtung, bei simultaner Messung von Windstärke und Geschwindigkeit. Barawid et al. (2007) berichten von einem Traktor mit einem 2D-Laserscanner an der Motorhaube zur Spureinhaltung zwischen den Baumreihen.

¹ unbefestigte Wege für Erntemaschinen

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Die klassische Messung und Erfassung inventurrelevanter Baum- und Geländeparameter ist mit einem enormen Zeitaufwand verbunden. Da u. a. zur Kontrolle der Bewirtschaftung der Forstbestände eine regelmäßige Datenerhebung (Forstinventur) Voraussetzung ist, wird deren Automatisierung angestrebt. Terrestrische Laserscannerpunktvolken bieten das Potential einer objektiven und automatischen Ableitung.

Beispielsweise werden zur Bestimmung des vorhandenen Festmeter-Holzes im Bestand Durchmesserbestimmungen entlang des Stammes durchgeführt, welche in der Regel mit einem Fällen des Baumes einhergehen. Eine effektive und zerstörungsfreie Methode der Durchmesserbestimmung am Stamm ist auf Basis terrestrischer Laserscannerpunktvolken automatisch möglich. Die automatische Ableitung von geometrischen Baumparametern beinhaltet u. a. die Durchmesserbestimmung in verschiedenen Höhen am Stamm und ermöglicht aufgrund der berührungslosen Messungen Volumenschätzungen am stehenden Stamm in sehr kurzer Zeit. Deshalb ist ein Ziel dieser Arbeit, Algorithmen zur Ableitung von Baumparametern zu entwickeln und anhand von manuell erhobenen Referenzdaten zu verifizieren. Dabei wird auf bereits bestehende Algorithmen aus der Literatur zurückgegriffen und neue Ansätze werden vorgestellt. Letztendlich wird eine vollautomatische Bestimmung von geometrischen Baumparametern aus einer Laserscannerpunktwolke angestrebt. Die Ableitung umfasst dabei die Extraktion des DGM, die Baumdetektion und die Bestimmung der Baumposition, der Baumhöhe, des BHD und weiterer Durchmesser entlang des Stammes. Dabei werden verschiedene Anforderungen an die zu entwickelnde Software gestellt:

- Zuverlässige Prozessierung sowohl von Single- als auch Multiple-Scan-Daten
- Scanparameter-unabhängige Prozessierung (z. B. Scanauflösung)
- Bestandsunabhängige Prozessierung (Baumart, Bestandsdichte, Bestandsart)
- Ausgabe der Parameter in einer Ergebnisdatei (*.txt)
- Ausgabe von 3D-Visualisierungsdateien auf VRML-Basis (Virtual Reality Modelling Language).

Eine automatische Objekterkennung von Baumstämmen ermöglicht eine Baumparameteranalyse unterschiedlicher Baumarten in Punktvolken verschiedener Scangebiete (z. B. forstliche Bestände, Straßenbäume, Stadtgebiete).

Anschließend sollen Registrierungsmethoden vorgestellt werden, die unter Verwendung von mehreren Standpunkten gerade in dichten Forstbeständen einen Vorteil bei der Registrierung bringen. Aufgrund von Verdeckungen durch die Vegetation ist hinsichtlich der Registrierung die Wahl der Verknüpfungspunkte (VP) sowie der Scannerstandpunkte begrenzt. Eine Methode zur Datenzusammenführung von ALS-Daten und TLS-Daten soll ebenfalls eingeführt werden. Ausgehend von georeferenzierten ALS-Daten und einer TLS-Punktvolke im lokalen Koordinatensystem soll die Datenfusion über die extrahierten Baumpositionen stattfinden. Aufgrund der Datenfusion ist eine Genauigkeitssteigerung hinsichtlich der Baumhöhenbestimmung zu erwarten.

Neben den vielen Vorteilen, die beim terrestrischen Laserscanning im Forst gegeben sind, sind auch Nachteile vorhanden. Umfassende Diskussionen sollen das Messverfahren für den Einsatz im Wald bewerten. Dennoch findet dieses vergleichsweise noch junge Messverfahren immer mehr Zuspruch bei der Lösung forstwirtschaftlicher und forstwissenschaftlicher Fragestellungen, die ebenfalls in der Arbeit beleuchtet werden.

1.4 Gliederung der Arbeit

In *Kapitel 2* werden zunächst die Grundlagen zum Laserscanning eingeführt, auf die in den folgenden Kapiteln zurückgegriffen wird. Neben der eigentlichen Datenaufnahme und der Datennachbereitung werden die Anforderungen an die terrestrische Laserscanaufnahme in Forstbeständen hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte beleuchtet. Zusätzlich werden aufgabenspezifische Scannertechnologien in der Holzindustrie vorgestellt.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit den Zielen und Methoden der Forstinventur am Beispiel der Bundeswaldinventur. Es werden die gängigsten Methoden zur Ableitung von forstinventurrelevanten Baumparametern und deren Messinstrumente vorgestellt, da sie die Grundlage der Referenzdaten für die spätere Datenauswertung bilden.

Die Studiengebiete, die zur Analyse und Validierung der vorgestellten Algorithmen Verwendung fanden, werden in *Kapitel 4* ausführlich beschrieben. Des Weiteren werden die Laserscannerinstrumente vorgestellt, die zur Datenaufnahme verwendet wurden.

Die entwickelten Algorithmen zur Ableitung forstinventurrelevanter Parameter werden in *Kapitel 5* vorgestellt und diskutiert. Da ein Großteil der Algorithmen im Programm *Autostem Forest™* der Firma TreeMetrics Ltd. umgesetzt wurde, wird abschließend das Software-Paket vorgestellt.

Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Registrierung von Punktwolken im Forst. Registrierte Punktwolken sind gerade im Forst sehr hilfreich, da Verdeckungen durch Mehrfachaufstellungen des Laserscanners minimiert werden. Neben der eigentlichen Registrierung der terrestrischen Punktwolken wird zusätzlich eine Methode zur kombinierten Registrierung von terrestrischen Laserscannerpunktwolken und Flugzeuglaserscannerpunktwolken vorgestellt. Aufgrund von Verdeckungen bei bodennahen Laserscanneraufnahmen im Kronenraum, kommt den Flugzeuglaserscannerdaten eine besondere Bedeutung zu, da sie das Kronendach vervollständigen und eine sinnvolle Ergänzung zu den terrestrisch gewonnenen Daten bilden.

Die Ergebnisse der entwickelten Algorithmen werden in *Kapitel 7* präsentiert und validiert. Die Referenz für die durchgeführten Vergleiche bilden, wenn nicht anders erwähnt, die manuell erfassten Baumparameter.

Das *Kapitel 8* stellt forstwissenschaftliche Anwendungen vor, bei denen das terrestrische Laserscanning einen entscheidenden Beitrag liefert. Neben zwei forstmeteorologischen Anwendungen wird die Baumartenbestimmungen anhand der Rindenstruktur der aus TLS-Daten abgeleiteten Höhenbilder vorgestellt.

Den Abschluss der Arbeit, mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick, bildet das *Kapitel 9*, in dem die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Parameterableitung aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken kritisch zusammengefasst werden. Aufgrund der Schnellebigkeit der entwickelten Sensoren wird ein Ausblick gegeben auf die Produktivitätssteigerung im Forst in Verbindung mit bildgebenden Sensoren, wie z. B. der Einsatz einer 3D-Kamera im Forst.

2 Laserscanning

Nachdem das Prinzip des Laserscannings bereits in Abschnitt 1.2.1 vorgestellt wurde, wird nachfolgend eine kurze Einleitung in die Grundlagen gegeben. Im folgenden Abschnitt liegt daher der Fokus auf der Behandlung von ALS und TLS, während sich das restliche Kapitel mit der Aufnahme und Auswertung von terrestrischen Laserscanneraufnahmen beschäftigt.

2.1 Grundlagen

Terrestrisches Laserscanning zählt zu den neueren 3D-Messverfahren und findet wachsendes Interesse in einem breiten Anwendungsbereich. Die Grundlagen des TLS sind zahlreich in der Fachliteratur, wie z. B. Kraus (2004) und Vosselman & Maas (2010), zu finden. Eine ausführliche Zusammenstellung wird u. a. in Kern (2003), Schneider (2009) und Dold (2010) präsentiert. Daher beschränken sich die folgenden Unterabschnitte auf grundlegende Aspekte des Laserscannings. Für weiterreichende Literatur wird u. a. auf die oben genannten Arbeiten verwiesen.

An dieser Stelle soll eine kurze Einführung in das Grundvokabular des Laserscannings gegeben werden, da dieses in der Arbeit immer wieder aufgegriffen wird.

Der Abstand der Punkte, sowohl horizontal als auch vertikal, wird durch die *Scanauflösung* angegeben. Aufgrund von Beugung am Linsenrand tritt der Laserstrahl nicht parallel aus und durchläuft den Weg mit einem Öffnungswinkel, der sogenannten *Strahldivergenz*. Die im Profil zylindrisch oder gaußverteilten Laserimpulse bilden sich bei Reflexion als runde Fläche (*Laserspot*) am Objekt ab. Die Größe des Spots wächst aufgrund der Strahldivergenz mit der Entfernung und wird mit spitzer werdendem Auftreffwinkel elliptisch abgebildet.

2.1.1 Distanzmessverfahren

Zwei elektro-optische Messprinzipien haben sich zur reflektorlosen Entfernungsmessung in geodätischen Messinstrumenten etabliert und werden auch in Laserscannern verwendet. Die Distanzmessverfahren werden in das Impulslaufzeitverfahren und das Phasenvergleichsverfahren unterschieden (Joeckel et al., 2008). Zusätzlich gibt es noch das Triangulationsverfahren, das als dritte Möglichkeit der indirekten Distanzmessung Verwendung in Laserscannern findet. Über Lasertriangulation werden indirekt die Strecken abgeleitet.

Das Impulslaufzeitverfahren (engl. *time-of-flight*) ermittelt aus der Laufzeit des ausgesendeten Laserimpulses und der Lichtgeschwindigkeit die überstrichene Distanz. Dabei ist die Genauigkeit der Streckenmessung durch die Genauigkeit der Zeitmessung beschränkt, die eine Streckenmessgenauigkeit von 6 bis 20 mm ermöglicht (Schneider, 2009). Mit diesem Verfahren sind Messungen großer Entfernungsbereiche möglich, weshalb es das Standardmessverfahren der Flugzeuglaserscanner ist.

Das Phasenvergleichsverfahren verwendet eine Modulations- und eine Trägerwelle zur Distanzbestimmung. Die Modulationswelle gibt maßgeblich die Reichweite des Distanzmessers vor. Die Trägerwelle ist kurzwelliger und wird von der Modulationswelle überlagert. Durch Reflexion der Welle wird das Signal phasenverschoben im Empfänger registriert. Die Analyse des modulierten Signals, mit dem ganzzahligen Vielfachen der Modulationswellenlänge und einem Phasenreststück, gibt Aufschluss über die Distanz. Während beim Impulslaufzeitverfahren Entfernungen bis zu mehreren Kilometern erreichbar sind, liegen die üblichen Reichweiten des Phasenvergleichsverfahrens um die 100 m, je nach Länge der Modulationswelle. Objekte über die maximale Reichweite hinaus erzeugen Mehrdeutigkeiten in der Distanzmessung, die sich als willkürlich angeordnete Punkte widerspiegeln. Im Vergleich zum Impulslaufzeitverfahren werden höhere Datenraten und Distanzmessgenauigkeiten (wenige Millimeter) erzielt.

Mit einer verhältnismäßig kleinen Reichweite von einigen Dezimetern (Joeckel et al., 2008) bis zu wenigen Metern ist das Triangulationsprinzip eher für kleine Messvolumen ausgelegt. Ausgestattet mit einer Kamera und einem im definierten Abstand befindlichen Projektor, wird kontinuierlich ein Laserstrahl auf das Objekt projiziert, der mit der Kamera aufgenommen wird. Aus der Lage und Orientierung des Projektors zur Kamera und der Position des projizierten Laserpunktes im Bild werden kartesische Koordinaten abgeleitet. Als photogrammetrisches Grundprinzip ist hier der Vorwärtsschnitt wiederzufinden. Durch Anordnung einer Zylinderlinse vor der Laserdiode wird eine

Laserlinie projiziert, die durch Bewegung eine 3D-Oberflächenbestimmung ermöglicht (Laserlichtschichtverfahren). Anwendung findet dieses Verfahren bei der Aufnahme kleinvolumiger Körper, z. B. Skulpturen, beim Reverse Engineering in der industriellen Messtechnik oder auch in der Medizin.

2.1.2 Signalauswertung

2.1.2.1 Diskrete Laserimpulse

Die ausgesendeten Laserimpulse haben, je nach der Strahldivergenz des Lasers und der Entfernung zum Objekt, einen Laserspot (mit einem Durchmesser) von mehreren Millimetern bis Zentimetern. Wird der Laserimpuls aufgrund der Spotgröße an Hindernissen unterschiedlicher Entfernung zum Laserscanner reflektiert (z. B. Äste einer Baumkrone), werden Impulse mit verschiedenen Laufzeiten empfangen. Man spricht vom 'First-Pulse-Echo' (FPE), wenn der erste zurückkehrende Laserimpuls registriert wird. Der letzte Impuls, der nach dem ersten Impuls die Empfangseinheit erreicht, wird als 'Last-Pulse-Echo' (LPE) gespeichert. Die meisten terrestrischen Laserscanner sind in der Lage, entweder den ersten oder letzten Laserimpuls zu speichern. Neueste Modelle ermöglichen die Digitalisierung von bis zu zehn Reflexionen pro Impuls (Pfennigbauer et al., 2009).

Die Unterscheidung in FPE und LPE bringt beim Flugzeuglaserscanning von Waldgebieten einen besonderen Mehrwert. Demnach repräsentieren die FPE-Daten überwiegend Reflexionen der Baumkrone. Die LPE-Daten wiederum enthalten überwiegend Bodenpunkte bzw. bei dichter Bodenvegetation auch Vegetationspunkte (Abbildung 2.1). Die zur Zeit auf dem Markt kommerziell eingesetzten Flugzeuglaserscanner sind in der Lage, neben dem ersten und letzten Impuls die Laufzeit mehrerer reflektierter Laserimpulse zu registrieren, die folglich Reflexionen im Kronen- oder Stammraum wiedergeben. Da der Laserimpuls eine definierte Länge hat (z. B. 5 ns), ist eine Trennung zwischen FPE und LPE erst ab einer Höhendifferenz von ca. 1 m möglich.

Beim TLS im Forst ist, bei Laserscannern die nach dem Impulslaufzeitverfahren messen, die Wahl der Erfassungsmethode (FPE oder LPE) ebenfalls ein entscheidender Punkt. So bilden Last-Pulse-Echos von bodennahen Standpunkten die innere Kronenstruktur und im besten Fall die äußere Kronenhülle ab.

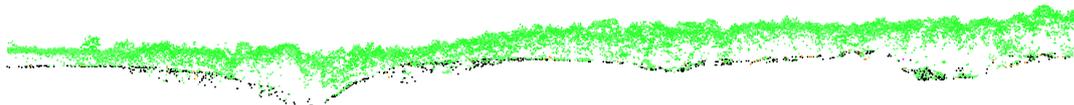


Abbildung 2.1: Profil eines ALS-Datensatzes eines Laubwaldbestandes (grüne Punkte = First-Pulse-Echo; schwarze Punkte = Last-Pulse-Echo).

2.1.2.2 Full-Waveform-Digitisation

Eine Steigerung der diskreten Punktregistrierung ist die Full-Waveform-Digitisation. Moderne Flugzeuglaserscannerinstrumente registrieren neben diskreten Mehrfachechos die zeitaufgelöste Amplitude des reflektierten Signals. Durch das Full-Waveform-Recording erhält man die Signalform, die Informationen über die passierten Hindernisse enthält. Mit Methoden der Signalverarbeitung werden diese digitalisierten Signale analysiert (Full-Waveform-Analysis – FWA). Je nach Beschaffenheit des Objektes ist ein unterschiedliches Reflexionsverhalten wahrzunehmen. Reflexionen eines Astes mit Blättern im Kronenraum sind weniger prägnant als die Reflexion des gleichen Impulses am Waldboden (Abbildung 2.2). Durchschnittlich werden im Vergleich zur FPE- und LPE-Messung bei der Analyse mit Gaußfunktionen (Abschnitt 2.1.2.3) um den Faktor drei mehr Punkte erzielt, die sogar genügend Stammreflexionen aufweisen (Reitberger et al., 2008).

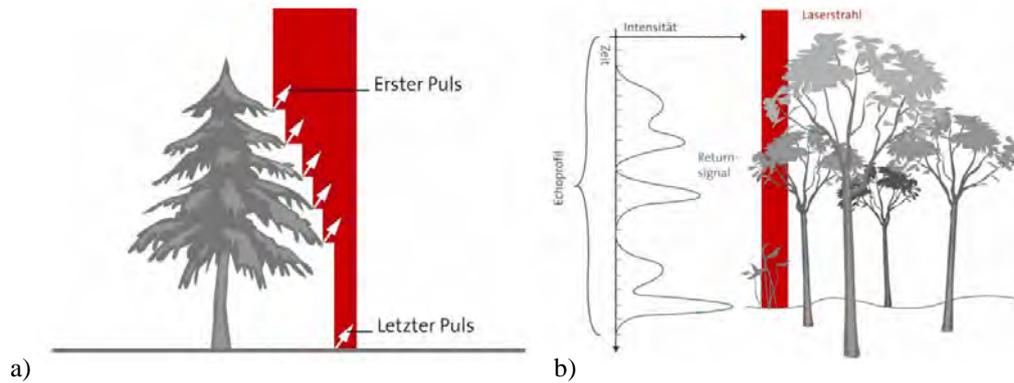


Abbildung 2.2: Prinzip des Flugzeuglaserscannings: a) Registrierung diskreter Echos; b) Full-Waveform-Digitisation (Reitberger, 2010).

Diese Datenerfassung ermöglicht bei Vegetation (sogenannte Volumenstreuer (Stilla et al., 2009), bei denen die traditionelle diskrete Punktregistrierung nur die äußere Hülle erfasst) eine Volumenrekonstruktion großer Gebiete. Von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) Ende der 90er entwickelt, ermöglicht der Laser-Vegetation-Imaging-Sensor (LVIS) die Ableitung vertikaler Dichteprofile von Waldgebieten auf der Grundlage sehr großer Laserspots am Boden (aufgeweiteter Spottedurchmesser, ca. 25 m bei einer Flughöhe von 10 km) (Blair et al., 1999). Die heutigen Instrumente arbeiten im Gegensatz zum LVIS mit kleineren Spots in Größenordnungen einiger Dezimeter, was an der geringeren Flughöhe sowie einer kleineren Strahldivergenz der Laserscanner liegt.

Ein speziell für die Vegetationsaufnahme entwickelter terrestrischer Laserscanner ist der Prototyp ECHIDNA® Validation Instrument (EVI). Dieser Panorama-View-Scanner ($360^\circ \times 267^\circ$) wurde für Zwecke der plotweisen Inventuraufnahme von der australischen Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) und zwei weiteren Partnern² entwickelt. Im Vergleich zu den klassischen terrestrischen Laserscannern registriert das EVI Full-Waveform-Signale mit 2 kHz, die wiederum eine Volumenrekonstruktion der bodennahen Vegetationsschichten ermöglichen. Die Strahldivergenz ist von 2 bis 15 mrad (variabel) verhältnismäßig groß, gewährleistet allerdings eine Reflexion mehrerer Hindernisse in der Entfernung bis zu 100 m (Strahler et al., 2008).

Der terrestrische Laserscanner Riegl VZ-400 ermöglicht die Aufzeichnung von Mehrfachzielen durch ein Online Waveform Processing. Das aufgezeichnete Signal wird online im Scanner verarbeitet und als Endergebnis ein Datensatz mit bis zu zehn Punkten pro Impuls geliefert, was die Durchdringungsrate gerade bei Vegetation steigert (Pfnennigbauer et al., 2009).

2.1.2.3 Impulsdetektion

Wann ein Impuls registriert wird, ist abhängig von der Impulsamplitude und dem Detektionskriterium (Wagner et al., 2004, Stilla et al., 2009). Als Kriterium kann das Amplitudenmaximum des reflektierten Impulses (Peak Detection) oder ein überschrittener Grenzwert der Amplitude (Leading-Edge-Detection) verwendet werden. Die gebräuchlichste Methode mit den geringsten Nachteilen gegenüber verrauschten Amplituden ist die Constant-Fraction-Detection (Wagner et al., 2004). Dabei wird die empfangene Amplitude invertiert und um einen konstanten Zeitwert verschoben. Die Summe beider Amplitudenstücke ergibt ein Signal mit einem Nulldurchgang, der maßgebend für die Impulsdetektion ist.

Eine etablierte Methode bei der FWA ist die Zerlegung der Waveform in Gaußfunktionen (engl. *gaussian decomposition*). Reitberger (2010) geht in seiner Dissertation auf die Grundlagen des Full-Waveform-Laserscannings ein und stellt die Ableitung mittels Gaußfunktionen näher vor. Eine Übersicht über die möglichen Detektionsmethoden der reflektierten Impulse bzw. Wellenfronten über die hier vorgestellten Verfahren hinaus ist in Stilla et al. (2009) gegeben.

2.1.3 Aufnahmebereich

Der Aufnahmebereich oder auch das Sichtfeld (engl. *field-of-view*) des Laserscanners gibt an, welcher Bereich bei der Ausnutzung des kompletten Scanbereiches horizontal und vertikal erfasst werden kann. Je nach eingesetzter Ablenkvorrichtung variiert das Sichtfeld. Grundsätzlich werden die Scanner in Camera-View- und Panorama-View-Scanner eingeteilt (Kern, 2003). Die Camera-View-Scanner zeichnen sich durch ein horizontal und vertikal begrenztes Sichtfeld aus. Charakteristisch für einen Panorama-View-Scanner ist seine Rotation um die Stehachse und somit die Abdeckung des kompletten horizontalen Scanbereiches (360°). Meistens ist der Messbereich nur durch das Stativ begrenzt und ermöglicht sogar eine Datenerfassung direkt über dem Scanner. Staiger (2003) führt mit dem Hybrid-Scanner einen dritten Scannertyp ein. Dieser unterscheidet sich vom Panorama-View-Scanner in der vertikalen Messfeldbegrenzung (z. B. 80° vertikal beim Riegli LMS-Z420i). In Abbildung 2.3 sind die Intensitätsbilder der drei Sichtfelder dargestellt.

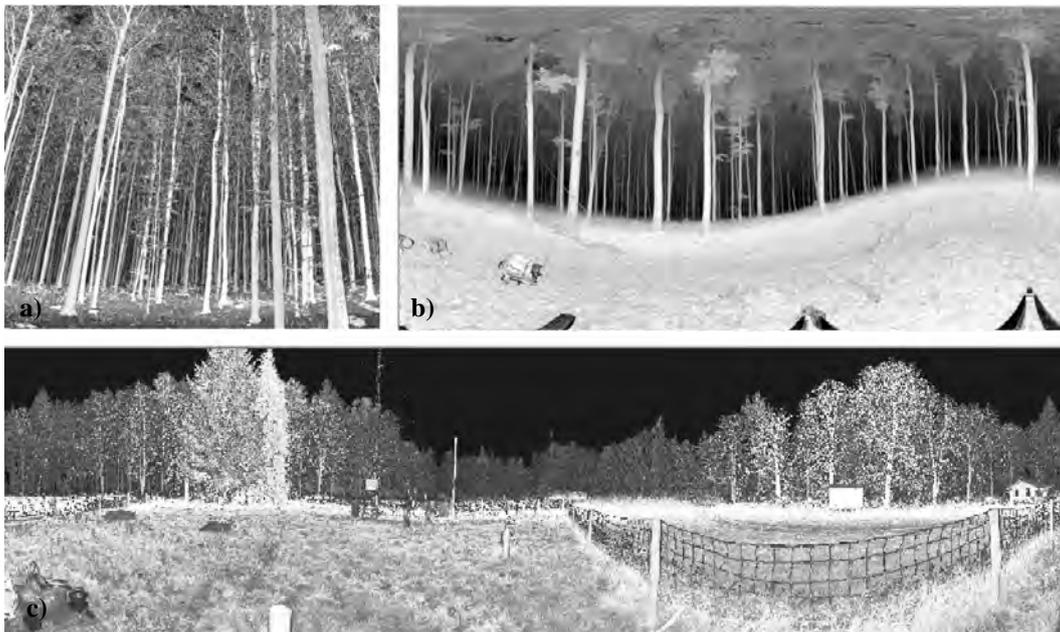


Abbildung 2.3: 2D-Intensitätsbilder von Scannern unterschiedlicher Sichtfelder: a) Camera-View-Scanner; b) Panorama-View-Scanner; c) Hybrid-Scanner.

2.1.4 Strahlableitung

Das Scannen bezeichnet eine kontinuierliche Abtastung entlang einer Oberfläche, die durch Ablenkung des Laserstrahls erreicht wird. Verschiedene Verfahren auf Spiegelbasis haben sich etabliert. Oszillierende Spiegel geben die Möglichkeit der Beeinflussung des maximalen Scanwinkels und der Geschwindigkeit. Sie produzieren ein Zick-Zack-Muster, an dessen Wendepunkten durch Richtungsänderung des Spiegels ein etwas dichter Punktabstand entsteht. Vier- oder achtseitige Polygonradspiegel, die um die Mittelachse rotieren, erzeugen ein reguläres Punktmuster mit maximalen Öffnungswinkeln bis zu 180° (vierseitige Spiegel mit 180° und achtseitige Spiegel mit 90° Öffnungswinkel). Panorama-View-Scanner scannen über Kopf, was durch eine schräg ausgerichtete, elliptische Spiegelfläche erzielt wird. Durch Rotation des Scanners um die Stehachse wird die Ablenkung quer zur Scanrichtung erreicht. Camera-View-Scanner hingegen erreichen die Strahlableitung durch zwei galvanometrische Spiegel (Schneider, 2009).

2.1.5 Strahldivergenz

Aufgrund der Strahldivergenz entstehen an konkaven und konvexen Kanten Effekte, die die Distanzmessung beeinflussen. Kern (2003) begründet dies mit einer ungleichen Intensitätsverteilung an schrägen Oberflächen. An Oberflächen an denen der Laserstrahl orthogonal auftrifft wird der Spot kreisförmig abgebildet. Je spitzer der

Auftreffwinkel an der Oberfläche ist, um so elliptischer wird der Laserspot dargestellt. Die Distanz wird aus dem Entfernungswert des Schwerpunktes der Ellipse ermittelt. Allerdings fallen die zentrische Achse des Laserkegels und der Schwerpunkt nicht zusammen, was in einer zu lang gemessenen Distanz resultiert (Gordon, 2008). Dies hat zur Folge, dass an Stellen an denen der Laserstrahl den Stamm streift:

- a) die Distanz zu lang gemessenen wird
- b) die Punkte nach außen versetzt abgebildet werden (Abbildung 2.4).

Diese Effekte verstärken sich mit zunehmender Strahldivergenz und Entfernung zum Scanner.

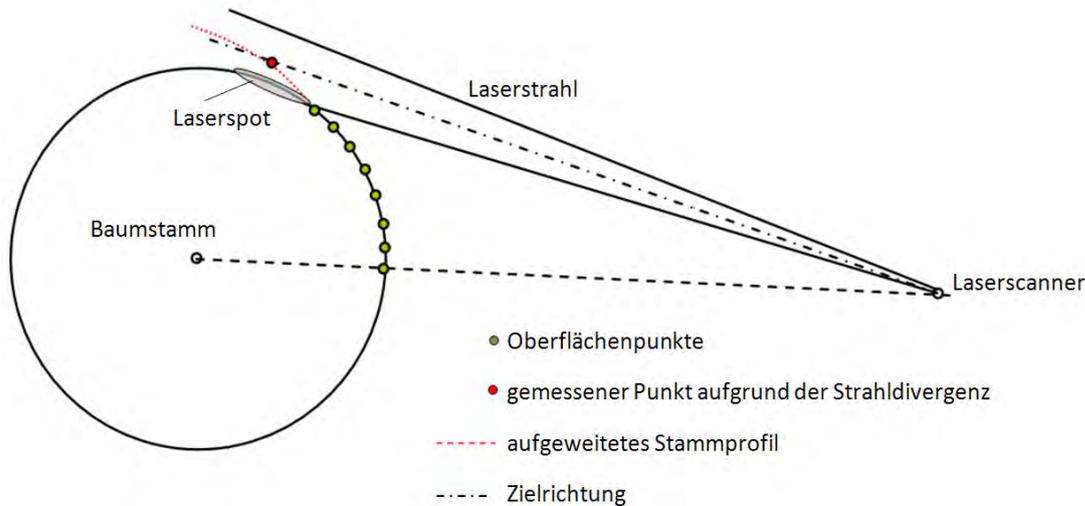


Abbildung 2.4: Einfluss der Strahldivergenz bei der Oberflächenmessung am Stamm.

2.2 Datenaufnahme

2.2.1 Aufnahmekonfiguration

Beim terrestrischen Laserscanning wird eine lückenlose Aufnahme der Objektgeometrie angestrebt. Dabei ist die Standortwahl zum einen von der technischen Ausstattung des Scanners (Reichweite, Sichtfeld) und zum anderen von der Objektgröße bzw. -ausdehnung abhängig. Für Aufnahmen im Forstbestand mit dem Ziel der automatischen Extraktion von inventurrelevanten Geometrieparametern unterscheidet man in zwei Aufnahmekonfigurationen (Thies & Spiecker, 2004): ein einziger Scannerstandpunkt (Single-Scan) und die Aufnahme von verschiedenen Scannerpositionen aus (Multiple-Scan).

2.2.1.1 Single-Scan

Unter einem Single-Scan versteht man die Datenerfassung von einem Standpunkt. Einhergehend mit nur einem Standpunkt sind Verdeckungen, die nicht umgangen, jedoch durch Variation der Standpunktposition minimiert werden können. Hinter jedem Baum entstehen sichttote Bereiche (Scanschatten), aus denen keine Vegetationsinformationen ableitbar sind. Von den Baumstämmen werden, wenn keine Verdeckungen vorliegen, Stammsegmente von bis zu 180° aufgenommen. Die Größe der aufgenommenen Stammsegmente, hängt von der Entfernung zum Baum und dem BHD ab (Abbildung 2.5).

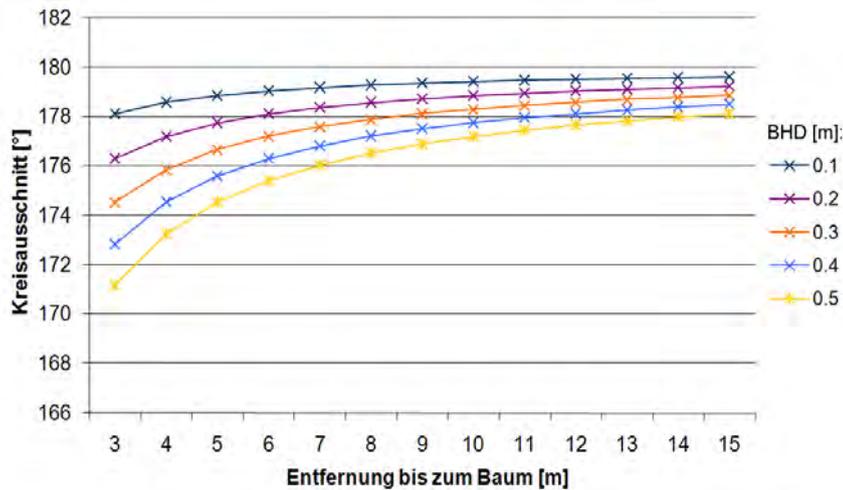


Abbildung 2.5: Das sichtbare Stammsegment (in Grad) in Abhängigkeit von der Entfernung (Baum - Scanner) und dem BHD (Kretschmar, 2008).

Vorteilhaft bei dieser Aufnahmekonfiguration ist die schnelle und effiziente Geometrieerfassung, da eine Registrierung von mehreren Standpunkten und somit die Verteilung von Verknüpfungspunkten im Scangebiet entfällt. Hinsichtlich der zu verwendenden Laserscanner eignen sich für diese Konfiguration besonders Panorama-View-Scanner. Begünstigt wird diese Messkonfiguration bei gering ausgeprägter bis fehlender Bodenvegetation (Kraut- und Strauchschicht).

2.2.1.2 Multiple-Scan

Im Gegensatz zur Single-Scan-Aufnahme wird bei der Multiple-Scan-Aufnahme von mehreren Standpunkten gescannt (Abbildung 2.6). Dies hat den Vorteil, dass bei günstiger Standpunktverteilung 360° des Stammes erfasst werden können. Auftretende Scanschatten, die bei nur einem Standpunkt vorhanden sind, können durch eine optimale Anordnung minimiert werden. Mehrere Standpunkte erfordern bei einer gemeinsamen Auswertung der Punktwolken eine Registrierung, was mit einem erhöhten Zeitaufwand verbunden ist. Dabei stellt die Verteilung von Verknüpfungspunkten im Scanbereich den größten Zeitfaktor neben der Registrierung dar (Jahn et al., 2004).

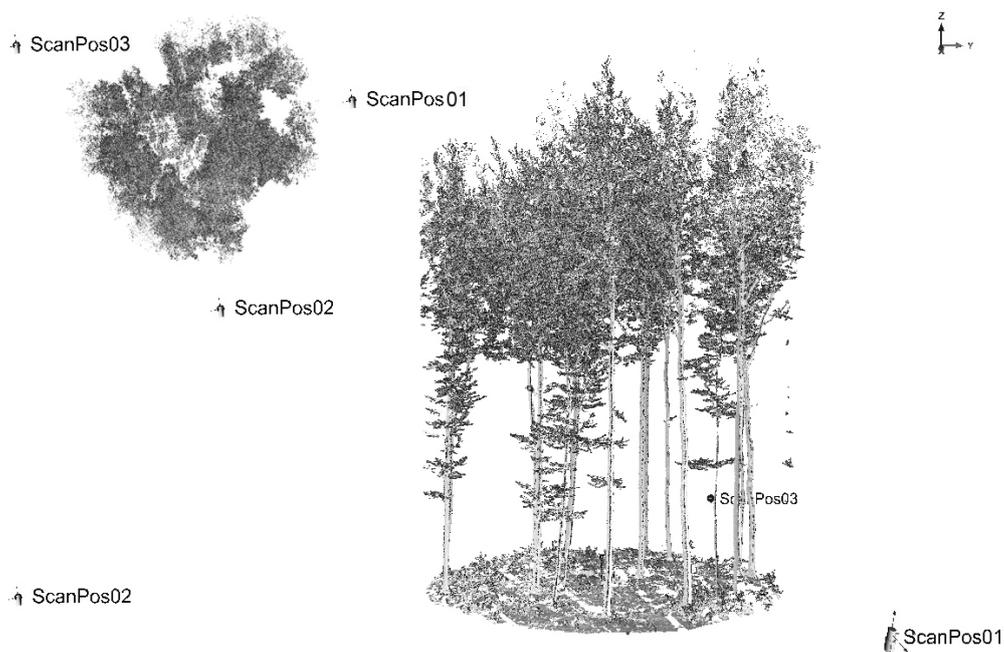


Abbildung 2.6: Multiple-Scan mit drei Aufnahmestandpunkten in der Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts) (modifizierte Abbildung aus Maas et al. (2008)).

Aufgrund von Bodenvegetation und Verdeckungen durch Baumstämme ist die Festlegung der Scannerpositionen vor dem ersten Scan unumgänglich, um eine optimale Verteilung der Verknüpfungspunkte zu realisieren. Für Aufnahmen mit dichter Bodenvegetation hat sich die Platzierung der Verknüpfungspunkte auf ausziehbaren Teleskopstangen bewährt. Hinsichtlich der Durchmesserbestimmung führen Multiple-Scan-Aufnahmen nicht immer zu einer Verbesserung in der Parameterbestimmung. Weiß (2009) begründet dies mit den unterschiedlichen Entfernungen der einzelnen Scannerstandpunkte zu den Bäumen und dem daraus folgenden Laserpunktabstand im Vergleich zur Single-Scan-Aufnahme. Zusätzlich beeinflussen Ungenauigkeiten in der Registrierung das Durchmesserergebnis. Tabelle 1 stellt die beiden Aufnahmekonfigurationen u. a. mit ihren Vor- und Nachteilen gegenüber.

Tabelle 1: Tabellarische Gegenüberstellung der Single-Scan- und Multiple-Scan-Aufnahme.

	Single-Scan	Multiple-Scan
Standpunktanzahl	1	≥ 2
Registrierung	nein	ja
Verknüpfungspunkte	nein	≥ 3
Vorteil	schnell	wenig Verdeckung, Dokumentation des kompletten Stammes möglich
Nachteil	Verdeckungen (wenn ein Baum zu nah am Scanner steht, sind teilweise komplette Bäume dahinter verdeckt), erfasster Stammbereich $< 180^\circ$	zeitaufwendig aufgrund mehrerer Standpunkte, Verteilung von VP, Postprocessing (Registrierung) erforderlich, große Datenmengen
Geeignet für	Panorama-View-Scanner	Camera-View-Scanner, Hybrid-Scanner

2.2.2 Verknüpfungspunkte

Verknüpfungspunkte dienen zum Zusammenführen mehrerer Scannerpositionen. Vor dem Scanprozess werden diese Punkte temporär im und um den Scanbereich weiträumig verteilt, sodass mindestens drei identische Punkte von zwei verschiedenen Scannerstandpunkten aus sichtbar sind. Mit manuellen oder automatischen Zuordnungsverfahren werden über homologe Punkte benachbarter Scannerstandpunkte die Punktwolken registriert.

Verschiedene Arten von Verknüpfungspunkten sind auf dem Markt vertreten (Abbildung 2.7). Dies können je nach Scannertyp planare runde oder eckige Zielmarken (z. B. mit Schachbrettmuster), Kugeln oder auch Zylinder sein. In Kern et al. (2010) werden die Verknüpfungspunkte in zwei Gruppen unterteilt:

- Räumliche Verknüpfungspunkte, bei denen über die Punktwolkenanordnung der Mittelpunkt bestimmt wird;
- Ebene Verknüpfungspunkte, bei denen die Mittelpunktinformation über Remissionswerte extrahiert wird.

Während die räumlichen Verknüpfungspunkte den Vorteil der allseitigen Sichtbarkeit haben und unempfindlich gegenüber teilweiser Verdeckung sind, sind sie dennoch unhandlich und ihre Anschaffungskosten sind relativ hoch. Bei den ebenen Marken lässt sich die allseitige Sichtbarkeit durch ein Zielmarkengestell realisieren, welches um den Mittelpunkt dreh- und kippar ist, was eine Neuausrichtung vor jedem Scan erfordert. Preislich sind diese Marken den 3D-Punkten überlegen, da bei vorliegender Druckvorlage die Marken vervielfältigt werden können. Ein weiterer Vorteil gegenüber den räumlichen Punkten ist die gleichzeitige Verwendung von bildgestützten Auswerteverfahren (Kamera) und die Anzielbarkeit mit geodätischen Messinstrumenten (Tachymeter, Theodolit). Eine Gegenüberstellung mit Vor- und Nachteilen der verschiedenen Zielmarkendesigns und deren Genauigkeiten wird in Kern et al. (2010) gegeben.

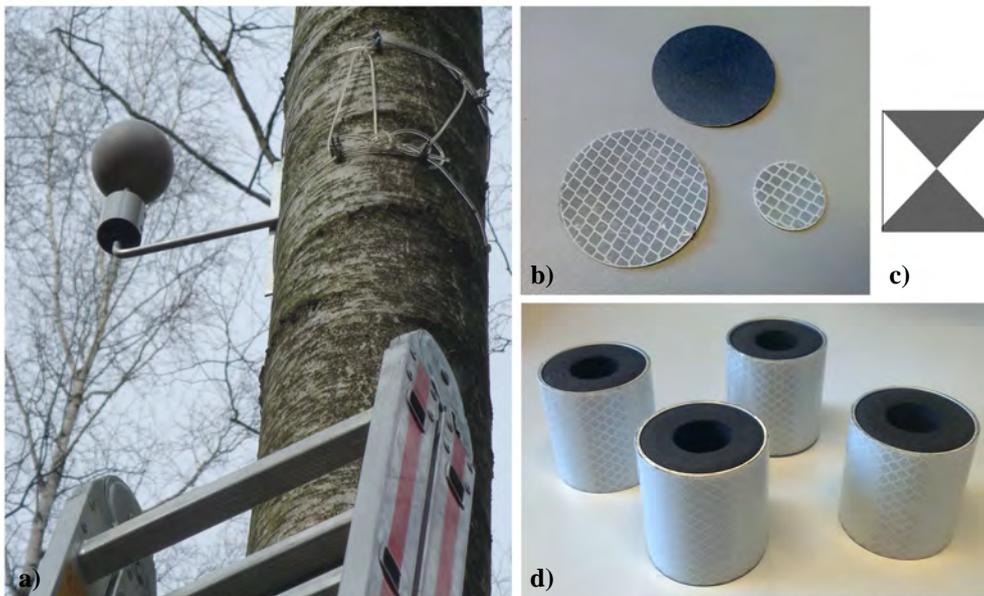


Abbildung 2.7: Zielmarkendesigns: a) kombiniertes Zielmarkendesign (Kugel und Zylinder in definiertem Abstand); b) retro-reflektierende Zielmarken unterschiedlicher Größen und Materialien; c) Schwarz-Weiß-Zielmarke; d) retro-reflektierende Zylinder.

2.3 Datennachbearbeitung

Unter der Datennachbearbeitung (engl. *postprocessing*) sind die Schritte zu verstehen, die notwendig sind, um die Laserscans der einzelnen Standpunkte einer gemeinsamen Auswertung bzw. Modellierung zu unterziehen. Dies beinhaltet u. a. die Registrierung und gegebenenfalls die Georeferenzierung sowie das Bereinigen der Daten. Diese Prozessierungsschritte sind in nahezu jeder Steuerungssoftware der gängigen Laserscanner realisierbar.

2.3.1 Registrierung

Um ein Objekt mit einem Laserscanner zu erfassen, sind in der Regel Multiple-Scan Aufnahmen notwendig. Die Komplexität der Oberflächengeometrie sowie deren Form beeinflussen die Standortwahl und die Anzahl der Standpunkte. Durch Messung der Polarkoordinaten definiert jeder Laserscannerstandpunkt ein lokales kartesisches Koordinatensystem (Abbildung 2.8). Der Prozess der Transformation der einzelnen Standpunkte in ein übergeordnetes Koordinatensystem (Projektkoordinatensystem) wird als Registrierung bezeichnet. Nicht selten ist es üblich, das Koordinatensystem eines zentralen Standpunktes als Projektkoordinatensystem festzulegen. Aber auch ein extern definiertes Koordinatensystem, aufgespannt durch bestimmte Punkte, bspw. entlang einer Gebäudeachse für Zwecke der Bauaufnahme, ist möglich.

Die vorhandenen Registrierungskonzepte lassen sich in drei Ansätze einteilen. Es gibt:

- die Registrierung unter Verwendung von Verknüpfungspunkten,
- die Registrierung über die Punktwolken selbst,
- sowie die Registrierung mit Hilfe von extrahierten Merkmalen aus der Punktwolke.

Die Registrierung anhand von Verknüpfungspunkten (VP) ist eine zuverlässige und genaue Methode, die Punktwolken in ein einheitliches Koordinatensystem zu überführen. Bei der Verwendung von Objektflächen und -geometrien ist eine Überlappung der Scanbereiche notwendig, um eine erfolgreiche Registrierung durchzuführen. Hinzu kommt, dass eine Grobregistrierung gegeben sein muss. Im Folgenden werden bestehende Konzepte vorgestellt, die terrestrische Laserscannerdaten aus der Kenntnis der Objektgeometrie und aus den daraus abgeleiteten Kenngrößen registrieren.

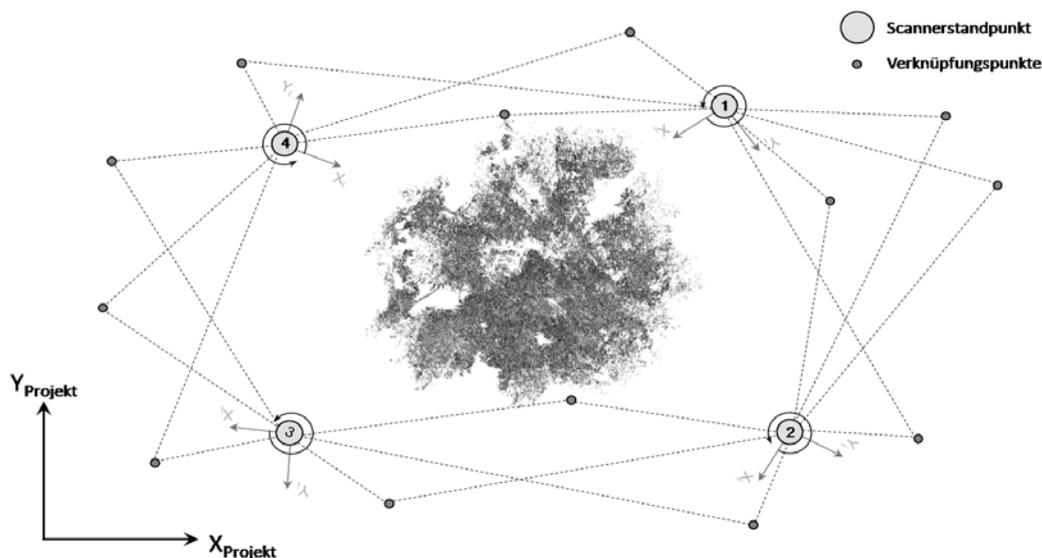


Abbildung 2.8: Prinzip der Registrierung anhand eines Forstplots (Draufsicht) mit vier Standpunkten und mit Verknüpfungspunkten außerhalb des Scanobjektes.

Stamos & Leordeanu (2003) extrahieren 3D-Linien aus den Scandaten von Architekturbauten und nutzen diese Information zur Registrierung zweier Scans. Ausgehend von zwei homologen Linienpaaren werden die Transformationsparameter bestimmt und über einen Algorithmus, ähnlich dem RANSAC (Random Sampling Consensus), iterativ weitere passende Linienpaare hinzugefügt, die letztendlich alle zur Transformationsberechnung verwendet werden. Extrahierte 3D-Objekte (Zylinder, Kugeln, Torus, Ebenen) aus Scandatenätzen von Industrieanlagen bilden die Registrierungsgrundlage in der Arbeit von Rabbani et al. (2006). Neben einer indirekten Methode, bei der die 3D-Objekte zunächst über Segmentierungsalgorithmen automatisch extrahiert werden und dann in den Prozess der Registrierung einfließen, wird eine direkte Methode präsentiert, die simultan die Bestimmung der Objekt- sowie Transformationsparameter der Registrierung bestimmt. Dold & Brenner (2004) führen eine Registrierung über homologe Ebenenstücke durch, die über eine Regionenexpansion segmentiert werden. Die Verschiebung der

Normalenvektoren in den Mittelpunkt einer Einheitskugel und deren Projektionen auf eine tesselierte Kugeloberfläche (Extended Gaussian Image – EGI) wird in Dold (2005 & 2010) vorgestellt. Die EGI weisen dieselbe Rotation wie die Scanszene, aus der sie geschaffen wurden, auf und werden über Korrelationen in Übereinstimmung gebracht. Die Registrierung von terrestrischen Laserscannerpunktwolken im Forst über extrahierte Baumstammachsen oder Mittelpunkte von Stammdurchmessern wird in Henning & Radtke (2008) und Li et al. (2010) vorgestellt.

Ein etabliertes Verfahren zur Registrierung von Punktwolken ist der ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point – ICP) (Horn, 1987; Besl & McKay, 1992). Durch Minimierung der Summe der Quadrate der Entfernungen zweier Datensätze werden die Punkte ausgerichtet. Voraussetzung für den Algorithmus ist ein genügend großer Überlappungsbereich identischer Datensätze und eine gute Näherungsausrichtung der Daten aus einer Grobregistrierung. Bae & Lichti (2004a) nutzen die Normalenvektoren und Krümmungsinformation benachbarter Punkte stark gekrümmter Bereiche zur Punktwolkenausrichtung. Ein Algorithmus, der über eine Ähnlichkeitstransformation durch Minimierung der Summe der Quadrate der Euklidischen Distanz von zwei Oberflächenpatches eine Registrierung durchführt, wird in Grün & Akca (2005) vorgestellt.

2.3.1.1 Punktzunordnungen

Die Punktzunordnung von korrespondierenden Punkten in mehreren Bildern oder Scandatenansätzen zur Registrierung stellt eine Grundaufgabe der Photogrammetrie dar. Im Bild wird dies über merkmalsbasierte und flächenbasierte Ansätze (Kreuzkorrelation, Least Squares Matching) realisiert. Bei der Punktzunordnung im 2D- und 3D-Raum sind die Aufnahmezeitpunkte sowie die Blickrichtung (Konvergenzwinkel) entscheidende Aspekte. Beispielsweise werden bei einem Bildflug zwei aufeinanderfolgende Bilder, in denen homologe Punkte vorhanden sind, innerhalb weniger Sekunden aufgenommen, während beim TLS mehrere Minuten bis zu ein paar Stunden zwischen zwei Aufnahmen verschiedener Standpunkte liegen können. Dies setzt eine zeitliche Stabilität der Verknüpfungspunkte voraus. Ein weiterer entscheidender Unterschied ist der Konvergenzwinkel zweier Aufnahmen. Während ein Konvergenzwinkel von 180° bei Bildaufnahmen unsinnig ist, stellen Scanaufnahmen unter Verwendung von 3D-Verknüpfungspunkten (Kugeln, Zylinder) unter diesem Winkel kein Problem dar (dies gilt für Verknüpfungspunkte mit geringen Entfernungen, solange die Winkelgenauigkeit der Streckengenauigkeit entspricht). Daraus resultiert, dass 3D-Verknüpfungspunkte zweier Scanaufnahmen, die von komplett unterschiedlichen Richtungen aufgenommen wurden, im Intensitätsbild unterschiedliche Bildausschnitte aufweisen. Da flächenbasierte Methoden der Bildverarbeitung in solchen Fällen scheitern würden, beschränken sich die meisten Ansätze der Punktzunordnung auf die Analyse der 3D-Koordinaten und der daraus abzuleitenden Größen (Winkel, Distanzen).

3D-Raum

Eine automatische Zuordnung von homologen Punkten einer 3D-Szene kann unter Einbezug der Raumgeometrie der Verknüpfungspunkte VP_i oder über robuste Schätzverfahren erreicht werden. Bei der Punktzunordnung über Distanzmuster wird die räumliche Anordnung der Verknüpfungspunkte verwendet. Für jeden VP_i werden zu den restlichen Punkten ($i+1, \dots, n$) alle möglichen Distanzen gebildet. Aufgrund der Distanzbildung besitzen zwei verschiedene Datensätze mit identischen VP ein einheitliches charakteristisches Distanzmuster, da die Distanzmuster translations- und rotationsinvariant sind (Abbildung 2.9). Analog zu den Distanzmustern gibt es Winkelmuster, die zusätzlich noch skalierungsinvariant sind. Eine Kombination beider Verfahren ist ebenfalls denkbar (Akca, 2003). Fehlende und zusätzliche Punkte sind, sobald die Anzahl begrenzt bleibt, handhabbar. Eine auch auf Distanzanalyse beruhende Methode wurde in Kang et al. (2007) vorgestellt.

Eine weitaus robustere Methode ist RANSAC. Dieses Schätzverfahren wurde von Fischler & Bolles (1981) vorgestellt und beruht auf einer Annahme und einer Analyse der Daten. Iterativ werden zufällige Punktkonfigurationen geschätzt, nach Anwendung der Transformationsparameter auf die restlichen Daten wird eine Analyse durchgeführt. In Abschnitt 6.1.1.3 wird RANSAC zur Punktzunordnung vorgestellt.

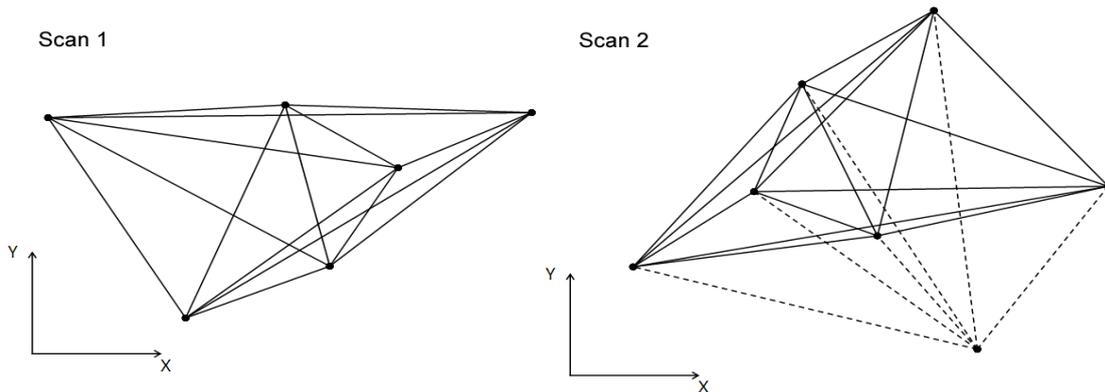


Abbildung 2.9: Distanzmuster von sechs homologen Punkten aus Scan 1 (links); rotiertes Distanzmuster mit einem zusätzlichen Verknüpfungspunkt aus Scan 2 (rechts).

2D-Raum

Über die 2D-Projektion der Scandaten auf eine Zylinder- oder Kugeloberfläche werden Intensitätsbilder erzeugt. Jeder Laserpunkt wird durch ein Pixel im Bild dargestellt und mit einem intensitätsgewichteten Grauwert versehen. Über die Punkt-Pixel-Korrespondenz ist eine Registrierung der Laserdaten anhand der Intensitätsbilder (Akca, 2003; Kang et al., 2007; Böhm & Becker, 2007; Meierhold et al., 2010) möglich. Die in Akca (2003) präsentierte Methode detektiert schwarz-weiße Marker in Intensitätsbildern über das Kreuzkorrelationsverfahren. Die Zuordnung homologer Marker geschieht über ein kombiniertes Distanz-Winkelmuster. Kang et al. (2007) nutzen den Moravec-Operator (Interestoperator) und ein Korrelationsverfahren, um markante Punkte im Intensitätsbild zu detektieren und zuzuordnen.

Eine Kombination aus SIFT (Scale-invariant feature transform) und RANSAC wird in Böhm & Becker (2007) vorgestellt. Der SIFT-Algorithmus (Lowe, 1999) wird genutzt, um in einem ersten Schritt (Descriptor) markante Bildbereiche zu detektieren, dabei wird ein Merkmalsvektor für jeden Bereich erstellt. In einem zweiten Schritt (Detektor) werden homologe Punkte aus beiden Datensätzen über die Berechnung der euklidischen Distanz der Merkmalsvektoren zugeordnet. Eine erfolgreiche und zufriedenstellende Zuordnung wird allerdings erst durch die Anwendung von RANSAC erreicht.

Meierhold et al. (2010) führt ebenfalls eine Registrierung mit Hilfe des SIFT-Algorithmus durch. Allerdings steht hier die relative Orientierung der Scandaten und der unabhängig vom Laserscannerstandpunkt aufgenommenen Kamerabilder im Vordergrund. Aus der Punktwolke eines Standpunktes wird ein zentralperspektivisches Intensitätsbild erstellt, um die geometrischen Unterschiede zum Kamerabild zu minimieren. Zur Optimierung der richtigen Zuordnung über die euklidische Distanz und zur letztendlich relativen Orientierung beider Datensätze wird im Anschluss eine Fundamentalmatrix berechnet. Al-Manasir & Fraser (2006) gehen noch einen Schritt weiter und führen über die relative Orientierung eines Kamerabildes zur Punktwolke und über die relative Orientierung zu einem anderen überlappenden Kamerabild mit Punktwolke die Registrierung der beiden Punktwolken durch.

2.3.1.2 Helmert-Transformation

Zur Überführung der einzelnen Koordinatensysteme in ein übergeordnetes System wird die Helmert-Transformation angewendet. Diese Transformation, auch 7-Parameter-Transformation genannt, überführt kartesische Koordinaten von einem Ausgangskordinatensystem (P_{Ist}) in ein Zielkoordinatensystem (P_{Soll}) (Abbildung 2.10).

$$P_{Soll} = X_0 + m \mathbf{R} P_{Ist} \quad (2.1)$$

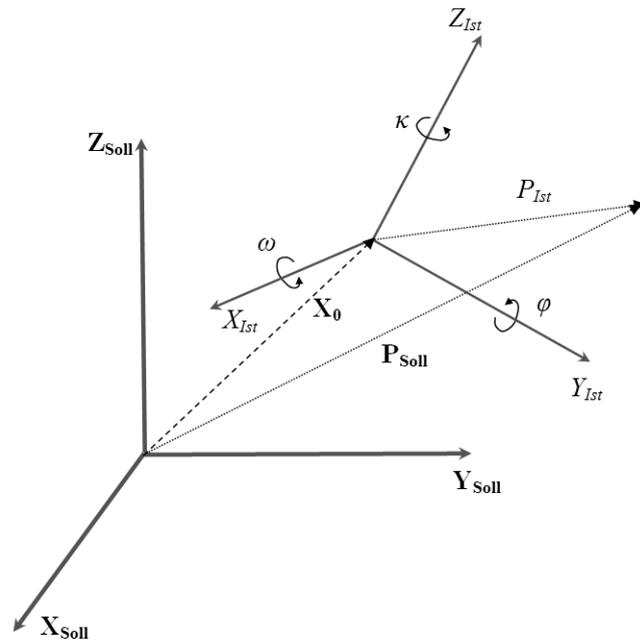


Abbildung 2.10: Prinzip der Helmert-Transformation.

Zur Überführung müssen mindestens sieben homologe Passpunktinformationen vorliegen. Zur eindeutigen Transformationsbestimmung sind zwei Vollpasspunkte mit den Lageinformationen (X , Y , Z) und ein Höhenpasspunkt mit (Z) ausreichend, die allerdings nicht auf einer Linie liegen dürfen. Weitere Passpunktinformationen führen zu einem überbestimmten Gleichungssystem, welches dann durch Verfahren der Ausgleichsrechnung gelöst werden kann. Die sieben Parameter sind:

- 3 Translationen $X_0(X, Y, Z)$
- 3 Rotationen ω , φ , κ in der Rotationsmatrix \mathbf{R}
- 1 Maßstab m .

Bei der Transformation von TLS-Daten ist in der Regel der Maßstab irrelevant (Maßstabsvorgabe durch den Laserscanner), so dass sich die Parameteranzahl auf 6 reduziert. Alternativ können die Winkel ω , φ , κ mit Quaternionen (a , b , c , d) ausgedrückt werden. Dies hat den Vorteil, dass keine Singularitäten bei der Winkelberechnung auftreten können. Die Grundlagen zur vermittelnden Ausgleichung sind in einschlägiger Literatur (z. B. Reißmann, 1980) zu finden. Im Anhang A.1 sind die Koeffizientenmatrix \mathbf{A} sowie der Beobachtungsvektor \mathbf{I} , die zur vermittelnden Ausgleichung der Helmert-Transformation benötigt werden, aufgeführt.

2.3.2 Georeferenzierung

Unter der Georeferenzierung versteht man die Überführung eines lokalen Datensatzes in ein übergeordnetes, erdfestes System. Dies lässt sich zum einen durch eine direkte Georeferenzierung, bei der die TLS-Standpunkte die räumliche Referenzinformation direkt aus den Parametern von Orientierungssensoren (INS, GNSS) erhalten, und zum anderen durch eine indirekte Georeferenzierung mittels Passpunkten realisieren. Letztere Variante ist aufwendig, da eine zusätzliche Passpunktbestimmung in beiden Systemen notwendig ist. In Bezug auf das MLS stellt die direkte Georeferenzierung, um die Bewegung räumlich und zeitlich zu registrieren, eine Grundvoraussetzung dar.

In jeglicher Hinsicht sind georeferenzierte Forstdaten, nicht nur die im Forst aufgenommenen TLS-Daten, sondern beispielsweise auch die Lage von Polterflächen (geerntetes, zugeschnittenes und gestapeltes Rundholz) oder die Stichprobenpunkte, bei der Forstinventur für einen zielorientierten Forstbetrieb von Interesse. Georeferenzierte Forstdaten sind Voraussetzung für eine optimierte Logistikkette von Forst- und Holzindustrie. Polterflächen, die georeferenziert sind, können nach der Holzernte im Bestand schneller gefunden werden. Eine Verwechslung bezüglich

der Holzinhaber ist ausgeschlossen, und kostenintensive und umweltschädigende Suchfahrten der Transporter durch den Wald bis zum richtigen Polter sind ausgeschlossen (NavLog, 2011).

Die Vermarkung der Stichprobenpunkte bei der Forstinventur mit GPS-Koordinaten ermöglicht neben dem schnellen Auffinden durch den Förster mit einem Handheld-GPS-Empfänger auch einen saisonalen Vergleich bezüglich des Holzzuwachses. Georeferenzierte TLS-Daten von Forstbeständen erlauben eine kombinierte Auswertung mit ALS-Daten, die hinsichtlich der Ableitung von Forstinventurdaten Vorteile bringen. Aber auch die Verwaltung mehrerer Stichprobenpunkte, die mittels TLS gewonnen wurden, lässt sich in einem Forst-GIS durch georeferenzierte Standpunkte leichter umsetzen. Raumbezogene Abfragen bezüglich Holzvorrat und Änderungsdetektionen lassen sich durch Überlagerung der Bestandsgrenzen umsetzen und geben Auskunft über den Besitzer des Holzes. Dies lässt wiederum eine optimierte Ernte von Holzbeständen zu. Nach Analysen im Forst-GIS werden gezielt Bestände herausgegriffen, die von Harvestern problemlos und lagerichtig angefahren werden können.

2.3.2.1 Direkte Georeferenzierung

Die direkte Georeferenzierung von am Boden aufgenommenen Daten im Forst erweist sich aufgrund der Baumkronen als Problem. Methoden der Orientierung über GNSS (z. B.: GPS, GLONASS, GALILEO) sind durch die Abschattung der Baumkronen und die Mehrwegeeffekte durch die Vegetation wenig erfolgreich. Im Wald ist daher im Vergleich zu städtischen Gebieten mit einer Genauigkeitsverschlechterung von 20 % bis 200 % zu rechnen (Korth & Resnik, 2005). Korth & Resnik (2005) unterscheiden zwischen Stamm- und Astholz, welches die Satellitensignale komplett abschattet, und dünnen Ästen mit Blattwerk, die das Signal dämpfen, verzerren oder gar ablenken. Eine Genauigkeitssteigerung ist demnach in der laubfreien Vegetationsperiode zu erwarten. Dennoch sind Standardabweichungen in der Positionierung mit Handheld-GPS-Empfängern von knapp 2 m bis 6 m (Korth & Resnik, 2005; Czaja, 2007) und im DGPS von < 1 m (Czaja, 2007) zu erwarten. Das Postprocessing dieser Daten erzielt eine Genauigkeitssteigerung mit dem Nachteil einer nicht in Echtzeit durchgeführten Koordinatenkorrektur. Navigationen in Echtzeit für den Harvestereinsatz oder für die Steuerung von Forstmaschinen können nicht allein über GPS-gestützte Lösungen erfolgen. Eine bundesweite Waldwegkartierung inklusive Klassifizierung stellt der NavLog-Datensatz der Firma NavLog GmbH dar. Die Daten von insgesamt 380.000 km Waldwegen wurden von Förstern und Forstbetrieblinhabern erhoben und von der NavLog GmbH in eine Datenbank eingepflegt (NavLog, 2011). Über die Kenntnis der Daten ist eine relative Navigation im Wald möglich.

2.3.2.2 Indirekte Georeferenzierung

Eine indirekte Georeferenzierung durch geodätische Passpunktbestimmung, wie tachymetrische Verfahren und Polygonzüge, ist möglich, wird aber teilweise durch die langen zu überwindenden Strecken bis zum Bestand unwirtschaftlich. Das Fehlen von Stütz- oder gar Abschlusspunkten führt zu einem offenen Polygonzug ohne Koordinaten- und Richtungsanschluss. Diese Art von Polygonzug liefert keine Kontrollmöglichkeiten über die gemessenen Brechungswinkel und Strecken und ist stark fehleranfällig. Lichtungen im Wald können genutzt werden, um Zwischen- und Abschlusspunkte mittels GPS oder des photogrammetrischen Verfahrens, der Aerotriangulation, zu bestimmen und somit die Länge des Polygonzuges zu minimieren und Kontrollmöglichkeiten zu schaffen. Eine weitere Möglichkeit für die Georeferenzierung der TLS-Daten eines Forstbestandes wird in Abschnitt 6.2 vorgestellt.

2.4 Charakteristik der Scannerdaten

2.4.1 3D-Punktwolken

Die 3D-Laserscannerdaten lassen sich zum einen als 3D-Punktwolken und zum anderen als 2D-Bilder visualisieren. Mit der Steuerungssoftware des Scanners, mit 3D-Modellierungsprogrammen oder mit speziellen Programmen, u. a. auf Basis von VRML, werden die Punktwolken dargestellt. Die Attributierung der Daten mit einem Farbwert geschieht hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte (Abbildung 2.11).

Attribute können sein:

- eine punktwolkenübergreifende (einheitliche) Farbe,
- Amplitudenwerte in Form von Grauwerten,
- original RGB-Werte von Fotos oder
- eine farb- bzw. grauwertcodierte Darstellung (z. B. nach Entfernung, Höhe oder Winkel).

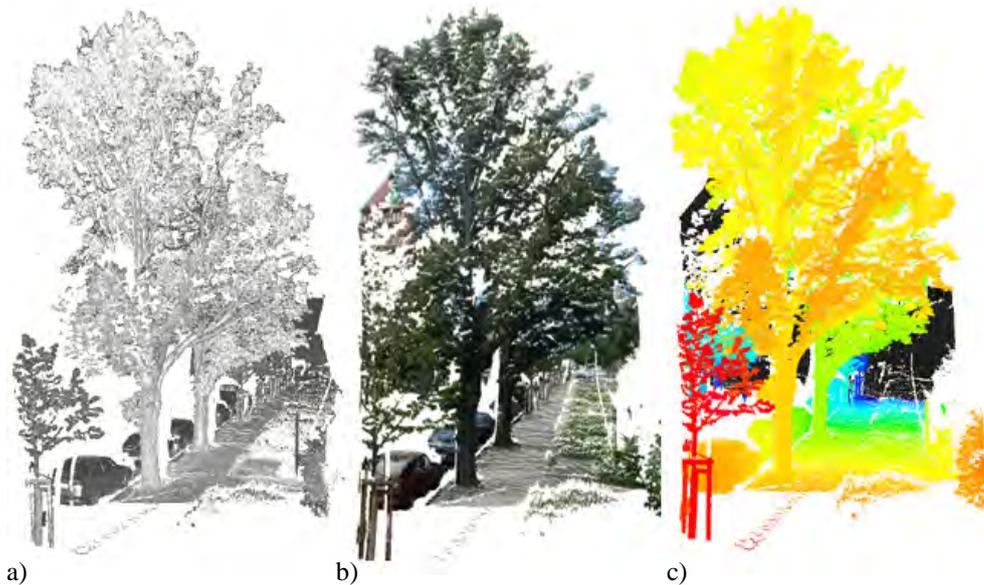


Abbildung 2.11: Verschiedene Punktwolkendarstellungen: a) Punktwolke mit Intensitätswerten; b) kolorierte Punktwolke mit Original-RGB-Werten; c) farbcodierte Punktwolke nach Entfernung.

2.4.1.1 Amplitudenwerte der Signalstärke

Nahezu jeder Laserscanner registriert neben der 3D-Strecke und dem Horizontal- sowie Vertikalwinkel für jeden Punkt einen Intensitätswert des reflektierten Laserimpulses. Die Intensität I^3 des Laserimpulses hängt von der Oberflächenbeschaffenheit, der Entfernung zum Objekt und dem Einfallswinkel des Laserimpulses auf die Objektoberfläche ab. Dies führt zu verrauschten Intensitätswerten, da die Energie beim Aussenden von Puls zu Puls um 15 bis 20 % schwankt (Vosselman & Klein, 2010). Normierte Intensitätswerte werden zur monochromatischen Visualisierung der Punktwolke oder eines Intensitätsbildes verwendet. Hoch reflektive Objekte (z. B. Reflektoren) erzeugen hohe Intensitätswerte, die als helle Bereiche im Bild dargestellt werden. Die Darstellung der normierten Werte der wenigen stark und der vielen normal reflektierenden Bereiche erzeugt ein Ergebnis mit einem geringen Kontrast. Eine Histogrammanpassung, bei der die dunklen Bereiche über einen größeren Grauwertbereich aufgespreizt werden, erzeugt ein kontraststärkeres Intensitätsbild bzw. eine kontraststärkere Punktwolke.

2.4.1.2 Bilddaten

Ein photorealistischer Eindruck der Scandaten wird durch das Einfärben der Punkte mit realen RGB-Werten aus Fotos erreicht. Mit mindestens sechs räumlich verteilten Passpunkten, deren Koordinaten im Objektraum bekannt sein müssen, und mit den Näherungswerten für die Orientierungsunbekannten wird über den räumlichen Rückwärtsschnitt auf Basis der Kollinearitätsgleichungen die innere und äußere Orientierung eines Bildes sowie die radial symmetrische Verzeichnung bestimmt. Je nach Parametrisierung der Verzeichnungsparameter erhöht sich die Anzahl der benötigten Passpunkte. Ist die innere und äußere Orientierung der Kamera zum Laserscanner bekannt, wird jeder einzelne Punkt in das Bild projiziert und mit dem vorliegenden Farbwert koloriert.

3 Der Begriff *Intensität* ist aus elektrotechnischer Sicht nicht korrekt, wird aber dennoch aufgrund der weitverbreiteten Nutzung in der Literatur als solcher verwendet.

Kolorierte Punktwolken oder gar texturierte Oberflächenmodelle sind für den Nutzer einfacher zu interpretieren und haben sich in den Bereichen der Architektur, der Denkmalpflege und der 3D-Stadtmodellierung etabliert. Über das Attribut Farbe lassen sich Klassifikationsmethoden anwenden. Haala et al. (2004) nutzen die Farbinformation einer Panoramakamera zur Texturierung von Baumstämmen. Texturanalysen des Stammraumes lassen Rückschlüsse auf die Baumart zu. Die unterschiedlichen Vegetationselemente (Blatt, Ast, Stamm) variieren hinsichtlich ihrer Farb- und Formgebung. Eine Erkennung der Zugehörigkeit der unorganisierten Punkte, ob sie einem Blatt oder Ast entstammen, wird durch kombinierte Klassifikationsmethoden, die Farb- und Formeigenschaften berücksichtigen, erreicht. Für diese Anwendung ist eine Aufnahme unter windstillen Bedingungen Voraussetzung.

2.4.2 Entfernungsbilder

Eine Darstellung der Scannerdaten in Form von Rasterbildern wird oft zu Visualisierungszwecken eingesetzt. Während der Informationsgehalt mit zunehmender Anzahl an Scanpositionen in der 3D-Visualisierung steigt, wird bei der Rasterbilddarstellung nur die Aufnahme eines einzigen Standpunktes visualisiert. Allerdings nimmt die Farbdarstellung (Entfernungscodierung, Intensitäten etc.) Einfluss auf die Interpretierbarkeit des Bildes. Genaugenommen handelt es sich bei diesen Darstellungen um 2,5D-Bilder. Der Grauwert des Pixels ergibt sich aus einer zusätzlichen, raumbeschreibenden Komponente. Üblich sind farbcodierte 2D-Darstellungen nach der Entfernung, der Höhe oder den Winkeln. Vosselman & Klein (2010) gliedern den Prozess der Bilderstellung in drei Schritte:

- Erstellung eines Rasterbildes,
- Bestimmung des Entfernungswertes und
- Grauwertbestimmung der Pixel.

Im Folgenden werden die Schritte zur Erstellung eines Entfernungsbildes kurz erläutert. Die Grauwertbestimmung einer nach der Höhe oder dem Winkel codierten Darstellung erfolgt in Analogie zu den in den nächsten Abschnitten vorgestellten Methoden.

Rasterbilderstellung

Die Größe des Bildes wird durch den gemessenen Objektraum einer Single-Scan-Aufnahme vorgegeben. Die Anzahl der Pixel in Spalte und Zeile resultiert aus den maximalen und minimalen Horizontal- sowie Vertikalwinkeln (φ , ν) und aus dem mittleren Punktabstand (Scanauflösung α) benachbarter Objektpunkte.

$$\text{Spalte} = (\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) / \alpha \quad (2.2)$$

$$\text{Zeile} = (\nu_{\max} - \nu_{\min}) / \alpha \quad (2.3)$$

Eine Pixelgröße, die im Objekt größer als der mittlere Punktabstand ist, führt zu mehreren Laserscannerpunkten innerhalb eines Pixels. Zur Grauwertcodierung wird letztendlich der Wert verwendet, der dem minimalen, dem maximalen oder dem Mittelwert aller Werte innerhalb einer Pixelbegrenzung entspricht. Fehler in der Winkelmessung oder eine zu kleine Pixelgröße führen zu leeren Pixeln ohne Punktinformation. Dem wird mit morphologischen Operatoren und einer Grauwertinterpolation entgegengewirkt (Meierhold et al., 2010).

Entfernungswertbestimmung

Als Entfernung kann die räumliche Strecke oder auch die Horizontalstrecke zum Oberflächenpunkt zur Grauwertberechnung verwendet werden. Speziell bei Forstszenen liegt der Vorteil der Horizontalstrecke auf der Hand. Die Pixel bzw. Punkte eines Stammes weisen im gleichabständigen Rasterbild gerade im oberen Stammbereich hohe Grauwertsprünge zu benachbarten Pixeln auf. Werden nun Horizontalabstände zur Grauwertcodierung verwendet, hat der Stamm trotz steigender Distanz mit der Höhe einen gleichbleibenden Grauwert. Dies ist vorteilhaft bei der Segmentierung von Baumstämmen.

Grauwertbestimmung

Die gemessenen Entfernungswerte vom Laserscanner zum Oberflächenpunkt lassen sich in zweidimensionalen Ansichten als Entfernungsbilder (engl. *range image*) und als entfernuncscodierte Punktwolken darstellen. Jedes Pixel bzw. jeder Punkt erhält einen entfernuncscodierten Grauwert oder Farbwert innerhalb eines bestimmten Entfernungsbereiches. Ein Grauwertsprung Δg bestimmt sich in Abhängigkeit vom abzubildenden Entfernungsbereich $s_{min} \leq s \leq s_{max}$ und von der Farbtiefe der Szene (z. B. 8 Bit = 256 Grauwerte). Die Grauwerte werden linear auf den Entfernungsbereich aufgeteilt. Punkte, die außerhalb des Entfernungsbereiches liegen, erhalten den Grauwert 0.

$$\Delta g = (s_{max} - s_{min}) / \text{Farbtiefe} \quad (2.4)$$

2.4.3 3D-Datenstrukturen

Wie in Abschnitt 1.2.1 bereits erwähnt, werden für jeden Punkt aus den drei Messelementen (Strecke, Horizontal- und Vertikalwinkel) kartesische Koordinaten (X, Y, Z) bestimmt. Zusätzlich werden die Intensität und – im Fall kolorierter Scannerdaten – die RGB-Werte abgespeichert. Je nach Datenauswertung ist es sinnvoll, alle erfassten Punktattribute zu verwalten. Dabei stellt die Verwaltung und Organisation großer Punktwolken einen entscheidenden Aspekt beim effizienten Programmieren mit geringen Zugriffszeiten dar. Eine Zusammenfassung möglicher Datenstrukturen für große Punktwolken ist u. a. in Wilke (2002) und Langetepe & Zachmann (2006) gegeben und wird hier der Vollständigkeit halber verkürzt dargestellt. Prinzipiell lassen sich die Datenstrukturen in nicht-hierarchische und hierarchische Strukturen einteilen.

2.4.3.1 Nicht-hierarchische Datenstrukturen

Punktlisten

Die Verwaltung der Punktwolke in einfachen Koordinatenlisten, so wie es die meisten Exportfunktionen von Softwarepaketen unterstützen, stellt eine nicht-hierarchische Datenstruktur dar. Nachbarschaftsbeziehungen sind den teilweise unsortierten Datenlisten auf den ersten Blick nicht zu entnehmen. Zum Auffinden von Einzelpunkten muss die Punktwolke im schlechtesten Fall einmal komplett durchlaufen werden. Eine Sortierung hinsichtlich einer Koordinatenachse (z. B. nach der Höhe) optimiert den Datenzugriff. Die Speicherung der Punktlisten in Binärdateien ist den Textdateien vorzuziehen, da neben der speicheroptimierten Datenarchivierung der Zugriff auf die Punktlisten schneller erfolgt.

Voxelräume

Eine effizientere Datenverwaltung der nicht-hierarchischen Strukturen stellt die Einteilung der Scanszene in konstante Gitterzellen dar (Voxel). Da jeder Laserscannerpunkt einem bestimmten Voxel angehört, konzentriert sich der Datenzugriff auf eine überschaubare Menge an Punkten innerhalb eines Voxels, was die Performance beeinflusst. Nachbarschaftsanalysen, wie sie aus der Bildverarbeitung bekannt sind, sind ebenfalls möglich.

Ein Voxel $V(k,l,m)$ ist ein dreidimensionales Äquivalent eines Pixels und repräsentiert einen dreidimensionalen Raum in Form eines Würfels. Genaugenommen ist das Wort Voxel ein Akronym für „volume element“. Der Voxelmittelpunkt befindet sich an einer diskreten Position im kartesischen Koordinatensystem mit den Indexkoordinaten k, l, m und achsparallelen Voxelkanten. Ein Voxelraum wird durch die lückenlose, gleichabständige horizontale und vertikale Aneinanderreihung mehrerer Voxel gebildet (Abbildung 2.12).

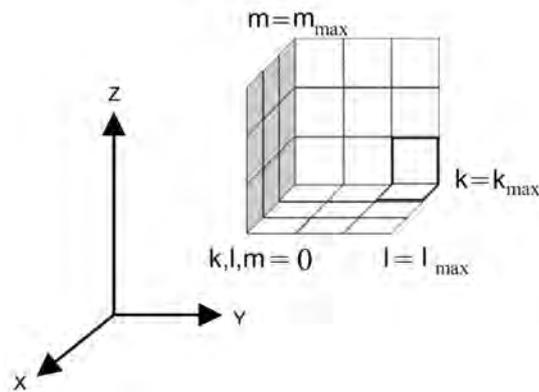


Abbildung 2.12: Definition eines Voxelraums.

Die Ausdehnung eines Voxelraumes wird durch die Begrenzungsbox (engl. *bounding box*) der Punktwolke mit X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} , Z_{min} und Z_{max} und der Voxelgröße v_{size} definiert. Mit Gleichung 2.5 wird jeder Datenpunkt der Punktwolke in den Voxelraum transformiert.

$$k = \frac{X_i - X_{min}}{v_{size}} \quad l = \frac{Y_i - Y_{min}}{v_{size}} \quad m = \frac{Z_i - Z_{min}}{v_{size}} \quad (2.5)$$

Voxel, die mindestens einen Laserscannerpunkt enthalten, gelten als „belegt“, während Voxelzellen ohne Datenpunkte als „leer“ registriert werden. Die Auflösung des Voxelraumes wird maßgebend durch die Voxelgröße vorgegeben. Mit zunehmender Voxelgröße findet eine Generalisierung der Darstellung statt (Abbildung 2.13). Die optimale Größe richtet sich nach der Ausdehnung des gerade noch aufzulösenden Objektes in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung.

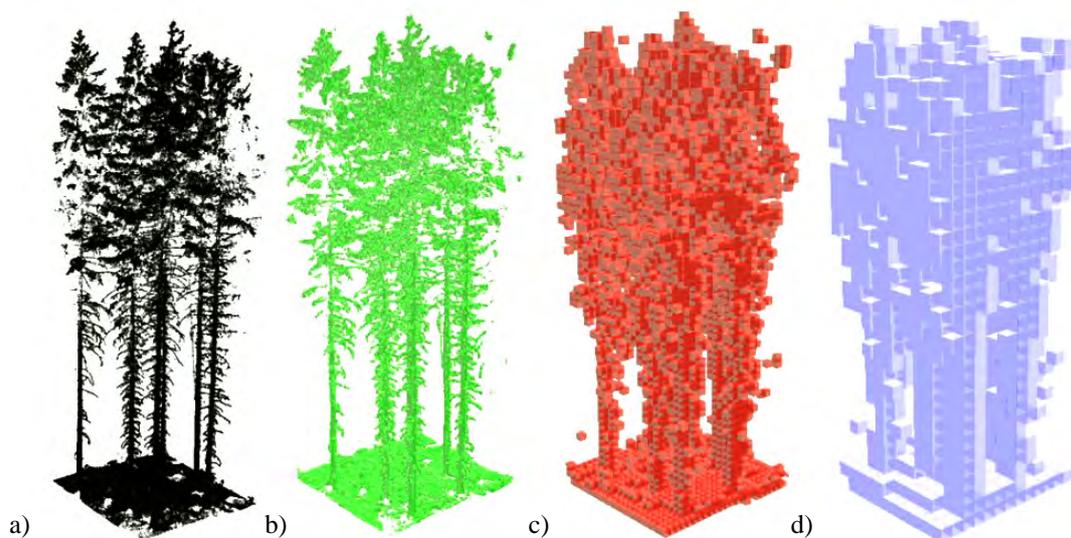


Abbildung 2.13: Voxelräume verschiedener Auflösungen: a) Punktwolke; b) 10 cm; c) 50 cm; d) 1 m).

Jedes Voxel kann zusätzlich noch mit mehreren Attributen ausgestattet werden. Denkbar wären Attribute der Farbe oder statistische Maße, wie die Standardabweichung oder der Mittelwert. Da die Nachbarschaft der Laserscannerpunkte durch die Indexkoordinaten vorgegeben ist, können Momente 1. und 2. Ordnung, die Aussagen über die Verteilung der

Punkte geben (Maas, 1999), berechnet werden. Eine weitere Beschreibung möglicher Voxelattribute ist in Abschnitt 8.1.2.1 zu finden.

In Durrieu et al. (2008) werden sphärische Voxel (SVoxel) vorgestellt. Der Grundgedanke der SVoxel entspringt der sphärischen Aufnahmegeometrie der terrestrischen Laserscanner. Anders als die gleichabständige Gitterstruktur des oben eingeführten Voxelraumes sind die SVoxel aneinandergrenzende Kugelsegmente. Definiert werden die SVoxel durch konstante Horizontal- und Vertikalwinkeldifferenzen ($\Delta\varphi$, $\Delta\psi$) und eine räumliche Streckendifferenz (Δs) zur Beschränkung der Voxeltiefe, wobei ds in Abhängigkeit von der Entfernung variabel sein kann, um ein konstantes Volumen der Voxel bei wachsenden Winkelwerten zu gewährleisten.

2.4.3.2 Hierarchische Datenstrukturen

Das Grundprinzip der hierarchischen Datenstrukturen beschränkt sich auf das Zusammenfassen von Bereichen gleicher Eigenschaften. In sogenannten Bäumen werden die Daten verwaltet. Über Knoten, die Hierarchieebenen, werden die Daten der nächstkleineren Verwaltungseinheit zusammengefasst. Die untersten Ebenen, die sich nicht mehr verzweigen, werden Blätter genannt.

Eine hierarchische 3D-Datenstruktur ist z. B. der Octree, bei dem der mit Punkten belegte 3D-Raum rekursiv in jeweils acht Würfel gleicher Kantenlänge geteilt wird, bis die vorgegebene Endgröße erreicht ist. Über Knotenelemente werden die belegten Bereiche verwaltet. Diese Methode ist weniger speicherintensiv in der Datenverwaltung als der Voxelraum, da nur die Bereiche abgelegt werden, die auch wirklich mit Punkten belegt sind. Lim & Suter (2009) verwenden sogenannte Super-Voxel zur Clusterung von Punkten unter Berücksichtigung der Farbe, Intensität, Krümmung und Punktdichte.

2.5 Anforderungen an die Datenerfassung

Der Einsatz terrestrischer Laserscanner für Aufnahmen im Forst stellt je nach wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Fragestellung Anforderungen an das Instrument und die Örtlichkeit mit den vorherrschenden Messbedingungen. In den veröffentlichten Studien und Publikationen wurden die verschiedensten Laserscanner eingesetzt, die im Forst neben Vorteilen auch Nachteile aufweisen. So wirken sich zum Beispiel Streupunkte, die aufgrund von Mehrdeutigkeiten des verwendeten Distanzmessers auftreten (z. B.: Wezyk et al., 2007; Schilling et al., 2011a) und Mehrfachaufnahmen zur Rekonstruktion einer vollsphärischen Aufnahme durch Verschwenken des Laserscanners aufgrund des limitierten Gesichtsfeldes (Henning & Radtke, 2006b) nachteilig auf die Datenerfassung und das anstehende Postprocessing aus. In den folgenden Abschnitten werden für forstinventurrelevante Zwecke mögliche Anforderungen an das TLS aufgezeigt. Ausgegangen wird dabei von dem größten Stichprobenkreis (Plot) mit einem Radius von 25 m, der bei der Bundeswaldinventur Verwendung findet.

2.5.1 Hardware

Die zur Zeit auf dem Markt etablierten Laserscanner unterscheiden sich erheblich in ihrer technischen Ausstattung. Nicht selten wurden die Instrumente für nur ganz bestimmte Einsatzbereiche hergestellt. Eine tabellarische Übersicht der auf dem Markt vertretenen terrestrischen Laserscanner nach Kenngrößen ist in Lemmens (2009a) gegeben. Generell kann eine Kategorisierung nach dem verwendeten Distanzmessverfahren, dem Aufnahmebereich und der mechanischen Ablenkung des Laserimpulses geschehen (Kern, 2003; Schneider, 2009). Prinzipiell gilt es, einen geeigneten Laserscanner für die vorgesehene Aufgabenstellung anhand der Kenngrößen zu bestimmen. Folgende charakteristische Kenngrößen spielen dabei eine Rolle:

- maximale Reichweite
- Genauigkeit (Distanz und Winkel)
- Datenrate
- Gesichtsfeld des Laserscanners
- Scanauflösung
- Strahldivergenz

- Datenaufzeichnung (First Pulse Echo / Last Pulse Echo)
- Laserklasse
- Scanausrüstung (Gewicht, integrierter PC, Kamera, externe Stromversorgung, GPS-Empfänger).

2.5.1.1 Technische Kenngrößen

Ein wichtiger Aspekt bei der Auswahl eines Scanners ist das verwendete Distanzmessverfahren, welches mit der Reichweite, der erreichbaren Distanzmessgenauigkeit sowie der möglichen Datenrate einhergeht. Die geforderte Reichweite der Distanzmessung des Scanners ergibt sich aus der maximalen Entfernung und Höhe des Objektes. Am Beispiel des größten üblichen Stichprobenradius von 25 m bei der Bundeswaldinventur und einer mittleren Baumhöhe von 35 m ergibt sich nach Berücksichtigung der Instrumentenhöhe von 1,3 m eine Mindestreichweite von:

- ca. 42 m bei Aufstellung im Plotzentrum;
- > 60 m bei Aufstellung außerhalb des Probekreises.

Bei geneigtem Gelände ist eine größere Reichweite notwendig. Während bei der Bestimmung der Entfernungen vom Plotzentrum zum Stamm, mit dem Ziel der Plotkartierung, meist dezimetergenaue Werte ausreichen, ist bei der Bestimmung von Stammdurchmessern die Distanzmessgenauigkeit entscheidend. Da bei der Ableitung meist ausgleichende Funktionen (Kreis, Ellipse) verwendet werden, wird der Einfluss der Distanzmessgenauigkeit reduziert. Allerdings sollte die Distanzmessgenauigkeit unter ± 1 cm liegen.

Mit einem äquiangularen Aussenden der Laserimpulse geht der mit der Entfernung zunehmende Punktabstand benachbarter Punkte einher. Um einen Punktabstand von 1 cm an 25 m entfernten Objekten zu realisieren, ist eine Scanauflösung von $< 0,03^\circ$ zu wählen. Die Datenrate sowie das Gesichtsfeld des Scanners sind Aspekte, die zum Messkomfort vor Ort beitragen. Für eine flächendeckende Aufnahme mit einem nahezu sphärischen Gesichtsfeld ($320^\circ \times 360^\circ$) hat sich eine Datenrate von mindestens 100.000 Punkten pro Sekunde etabliert. Eine geringere Datenrate geht bei gleicher Auflösung mit einer höheren Scanzeit einher. Werden Aufnahmen von mehreren Standpunkten aus gemacht, müssen diese über geeignete Verknüpfungspunkte bzw. -objekte registriert werden. Hierbei eignen sich geometrische 3D-Objekte (Kugel, Zylinder) aufgrund der allseitigen Sichtbarkeit eher als 2D-Zielmarken.

Beim Einsatz eines Laserscanners im Wald ist die Laserklasse hinsichtlich der Augensicherheit weniger entscheidend. Generell sollte allerdings darauf geachtet werden, dass ab Laserklasse 2 der direkte längere Sichtkontakt vermieden und ab Laserklasse 3R eine Schutzbrille getragen wird.

Verschiedene Oberflächen absorbieren und reflektieren die einfallende Strahlung in objektspezifischer Weise. Je nach Wellenlänge des Laserscanners gibt es spektrale Bereiche, bei denen bestimmte Oberflächen eine Absorption der Strahlung aufweisen. Demnach ist für die Rinde verschiedener Baumarten auch eine Unterscheidung aufgrund der Amplitude möglich.

2.5.1.2 Scanausrüstung

Selten sind die Stichprobenflächen direkt mit einem Fahrzeug zu erreichen und ein längerer Transportweg bis zu einigen hundert Metern muss in Kauf genommen werden. Je nach Bestand kann die Krautschicht (bis 1,5 m Höhe) und Strauchschicht (bis 5 m Höhe) so stark ausgebildet sein, dass der Transport einer umfangreichen und schweren Messausrüstung umständlich und zeitaufwendig ist. Innovative Rucksacklösungen zum Transport des Scanners und Stative mit wenig Eigengewicht, z. B. aus Carbon, sind Alternativen zu schweren Transportkoffern und herkömmlichen Holzstativen. Auch der Einsatz eines geländefähigen Quads zum Transport der Messausrüstung kommt in Frage. Laserscanner mit einem integrierten PC, der bei den neueren Modellen der Hersteller Standard ist, erlauben einen schnellen Auf- und Abbau der Scanausrüstung. Mit voreingestellten Scanparametern, die im Instrument gespeichert werden, wird über ein Display der Scanprozess gestartet. Scannermodelle, bei denen die Bedienung nur über einen Laptop realisiert werden kann, können alternativ über eine WLAN-Verbindung gesteuert werden. Der Laptop bleibt stationär an einer Position stehen, während die Position des Scanners im Umkreis des Laptops variiert wird. Bei mehr als zwei Standpunkten ist diese Variante der Datenübertragung und Steuerung zeitlich gewinnbringend.

2.5.1.3 Stromversorgung

Eine externe Stromversorgung durch Hochleistungsakkus von mindestens vier Stunden Laufzeit ist für eine wirtschaftliche Inventuraufnahme mit mehreren Plots ebenfalls Voraussetzung. Alternative Stromversorgungen, wie z. B. Solar- oder Benzingeneratoren, sind im Wald nicht praktikabel. Solargeneratoren, die die Sonnenenergie direkt in elektrische Energie umwandeln, sind zwar eine günstige Alternative zur Sicherung einer konstanten Akkuleistung im Parallelbetrieb. Allerdings ist eine direkte Sonneneinstrahlung unter einem nahezu vertikalem Einfallswinkel von 90 ° für eine optimale Energieausbeute Voraussetzung, was den Einsatz im Waldinneren nahezu ausschließt und auf Waldlichtungen beschränkt. Benzin-Generatoren sollten wegen der Waldbrandgefahr generell gemieden werden.

2.5.2 Standpunkt

Neben den oben erwähnten instrumentellen Anforderungen sind bei der Wahl der Scannerstandpunkte ebenfalls Restriktionen gesetzt. Beim Aufbau des Scanners sind je nach Scannertyp bestimmte Mindestabstände einzuhalten, unterhalb derer keine Distanzmessung möglich ist. Für eine Aufnahme im Forst eignen sich Bestände mit wenig Bodenvegetation am besten, da keine Sichtbehinderung stattfindet. Wenn möglich, sollte störende Vegetation für Zwecke der Aufnahme im Umkreis des Standpunktes (bis zu 2 m) entfernt werden. Für Zwecke der Inventur ist gegebenenfalls eine Erhöhung der Standpunktanzahl in Abhängigkeit von der Dichte des Bestandes notwendig. Bei der Aufnahme von Plantagen, bei denen die Bäume in einem konstanten Abstand gepflanzt worden sind, ist der Scanner außerhalb der Baumreihen zu platzieren, damit die geringsten Abschattungen auftreten.

Ausfahrbare oder -klappbare Spezialstative, die den Einfluss störender Bodenvegetation gering halten, ermöglichen zudem weniger steile Einfallswinkel der Laserimpulse auf die Vegetation im Umkreis des Standpunktes, was für Zwecke der Bodenvegetationsanalyse (Loudermilk et al., 2007) bzw. der Geländemodellgenerierung Vorteile bringt. Aufnahmen von Hebebühnen und (geodätischen und meteorologischen) Messtürmen, wie sie in Moorthy et al. (2010) und in dieser Arbeit vorgestellt werden, sind leider die Ausnahme. Sie ermöglichen einen Blick direkt von oben auf die Baumkronen und simulieren ein ALS-System mit einer höheren Punktdichte. Arbeitsbühnen haben allerdings den Nachteil, dass sie durch den Betrieb des Scanners in leichte Vibration versetzt werden, was wiederum Einfluss auf die Genauigkeit der Positionierung hat.

2.5.3 Wetter

Je nach Einsatzgebiet des TLS gestalten sich die Anforderungen an das Wetter und die Örtlichkeit. Zur Beobachtung saisonaler Strukturveränderungen eines Bestandes sind mehrmalige Aufnahmen über das Jahr verteilt nötig, u. a. auch im Winter. Da die Betriebstemperatur der meisten Scanner zwischen 0 °C und 40 °C liegt (Lemmens, 2009a), ist speziell in den Wintermonaten bei einem Einsatz auf die Umgebungstemperatur zu achten, um eine problemlose Aufnahme zu gewährleisten. Obwohl die meisten Scanner vor Spritzwasser geschützt sind, empfiehlt es sich, auf einen Einsatz bei Regen zu verzichten. Auch schneebedeckte Oberflächen können bei Laserscannern mit einer Wellenlänge von ca. 1.500 nm zur Absorption des Signals führen.

Steht die Dokumentation der Asttopologie im Vordergrund, so wird die Krone nach Laubabwurf gescannt, was am besten in den Herbst-, Winter- und Frühjahrsmonaten geschieht. Eine laubfreie Vegetationsperiode begünstigt ebenfalls eine direkte Georeferenzierung der Daten über GNSS (Korth & Resnik, 2005).

Aufgrund der sequentiellen 3D-Punktbestimmung sind Laserscanner wenig geeignet für die Dokumentation kinematischer Vorgänge. Die Erfassung von Waldbeständen wird vorzugsweise bei Windstille durchgeführt, dennoch ist eine Bewegung von Baumspitzen, dünnen Ästen oder Blättern durch spontan auftretende Windböen nicht auszuschließen. Je nach Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit treten verschiedene Effekte auf (Abschnitt 7.1.5). Im Allgemeinen bewegen sich die Blätter sehr hochfrequent, sodass als Effekt eine „verschmierte“ Darstellung zu beobachten ist.

Im Gegensatz zu klassischen photogrammetrischen Aufnahmeverfahren ist Laserscanning ein aktives Messverfahren, welches unabhängig von der Umgebungsbeleuchtung arbeitet und selbst nächtliche Aufnahmen ermöglicht. Im Forst liegen erschwerte Lichtbedingungen vor. Je nach Vegetationsart und -dichte variiert die diffuse Beleuchtung des Tageslichtes und die direkte Sonneneinstrahlung. Das geschlossene Kronendach eines

Buchenbestandes zum Beispiel schattet den Waldboden von jeglicher Sonneneinstrahlung ab. Wird eine kombinierte Auswertung der Punktwolken mit den RGB-Informationen von Kamerabildern angestrebt, z. B. für Zwecke der Vegetationsklassifizierung, ist auf eine homogene Ausleuchtung zu achten.

2.6 Aufgabenspezifische Scannertechnologien in der Holzindustrie

Der nachwachsende Rohstoff Holz zählt zu den wichtigsten Werkstoffen. Bereits in der Altsteinzeit wurden Hölzer als Werkzeuge, als Baumaterialien und zur Energiegewinnung in Form von Lagerfeuerholz genutzt. Heutzutage verarbeitet die Holzindustrie den Rohstoff in den verschiedensten Formen, allen voran die Nutzung als Schnittholz, die einen hohen Anspruch an die Qualität des Holzes stellt. Weniger qualitative Hölzer werden als Industrieholz z. B. zur Herstellung von Zellstoff und Papier oder als Energieholz weiterverwendet.

Die Rundhölzer werden in aufgabenspezifischen Sägewerken je nach Anwendungsbestimmung zurechtgeschnitten. Um einen optimierten, qualitätsorientierten und effektiven Holzzuschnitt in den Sägewerken zu erreichen, werden Scannertechnologien eingesetzt. Förderanlagen mit integrierten Scannersensoren ermöglichen einen automatisierten und präzisen Zuschnitt mit sehr hohen Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 400 m/min (WoodEye, 2011). Nicht nur die Vermessung des Rundholzes zum Zuschnitt der Länge wird über die Scannersensoren gelöst, sondern auch die Qualitätskontrolle des Holzes. Das Holz lässt sich in verschiedene Güteklassen einteilen. Dabei beeinflussen:

- Farbfehler (Pilzbefall, Rotfäule)
- Holzfehler (Astigkeit, Beulen)
- Formfehler des Schnittholzes (z. B. Verbiegungen, Verdrehungen und Krümmungen)
- innere Holzfehler (Dichtevariationen, innere Risse)

die Qualität des Holzes (Knuchel, 1947; Cramer & Scholz, 1997). Allerdings ist eine Sensorart nicht allein in der Lage, alle Arten der Holzfehler aufzudecken. Kombinierte Verfahren der Lasertriangulation, der Röntgendiagnostik, des Laser-Scatterings (Springer, 2011) und der Bildaufnahme durch Kameras werden zur Einteilung der Holzqualität eingesetzt.

Eine fehlerhafte innere Holzstruktur hat eine höhere Dichte als normal gewachsenes Holz. Röntgenaufnahmen, wie sie aus der Medizin bekannt sind, werden zur Detektion und Lokalisierung der Defekte eingesetzt. Innere Holzfehler beeinflussen die Stabilität und mindern die Holzqualität. Multisensorielle Scannertechnologien führen eine objektive Einteilung in Güteklassen durch und haben eine Automatisierung der früheren aufwendigen manuellen Kategorisierung des Holzes zur Folge. Echtzeitkontrollen der Produktion und eine Steigerung der Produktqualität und Produktivität werden erreicht (LuxScan, 2009). Nach dem Scanprozess von Schnittholz werden farbliche und strukturelle Veränderungen detektiert und deren Lage und Größe wird berechnet. Anschließend wird mit dem wenigsten Wert- und Holzverlust zugeschnitten (Abbildung 2.14).



Abbildung 2.14: Prozesskette des optimierten Holzzuschnittes (LuxScan, 2009).

Xiao (1998) stellt ein multisensorielles System zur Holzanalyse vor, das an der Virginia Tech in Blacksburg (USA) entwickelt wurde mit dem Hintergrund, die aufwendige und subjektive Beurteilung durch Personen zu vermeiden. Dieses vereint Kamera, Lasersensor und Röntgengerät in einem und gibt dem Nutzer eine Schadenskartierung des untersuchten Holzstücks mit Angabe von Lage, Größe und Art des Schadens aus. Nestler & Franke (2000) präsentieren einen Ansatz, der die RB-NIR-Kanäle einer dichroitischen Zeilenkamera mit zwei Profillasern und einer Flächenkamera

kombiniert. Mit bis zu 2.000 Profilen pro Sekunde werden über das Triangulationsverfahren geometrische Abweichungen des Holzes detektiert. Radiometrische Änderungen wie Verfärbungen und strukturelle Holzeigenschaften, z. B. die Detektion der Wasserleitzellen, die Aufschluss über tiefer liegende Astansätze oder Pilzbefall liefern (Tracheide-Effekt), werden aus den Remissionswerten der Laserlinie durch Aufnahme mit der Zeilenkamera abgeleitet.

Während Röntgengeräte zur Aufdeckung innerer Holzfehler in 2D schon seit Längerem eingesetzt werden, steht der kommerzielle Einsatz von Computertomographen (CT) in der Holzindustrie erst am Anfang. Aufgrund der sequentiellen Messmethode eines Computertomographen wird bei Weitem nicht die Geschwindigkeit erreicht, die mit einem Röntgengerät möglich ist. Allerdings liegt der Vorteil eines CT in der dreidimensionalen Erfassung und räumlichen Bestimmung von Holzfehlern noch vor dem Zuschnitt. Mit dieser zerstörungsfreien Methode ist man in der Lage, den Holzzuschnitt zu optimieren und eine qualitativ höhere Holzausbeute zu realisieren. Das Stamm wird vor dem Zuschnitt in der Lage so angepasst, dass so wenige Bretter wie möglich von dem Holzfehler betroffen sind. Mit Methoden der Bildverarbeitung werden aus den CT-Bildern strukturelle Auffälligkeiten detektiert (Oja, 2000; Bhandarkar et al., 1999).

2.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen des TLS behandelt, die die Basis für die im Rahmen der Arbeit entwickelten Methoden darstellen. Die klassischen Anwendungsgebiete eines Laserscanners sind in den Bereichen der Architektur, der Archäologie, des Facility Management und der Industrievermessung zu finden. Bewaldete Gebiete stellen demnach eine große Herausforderung an das TLS. Hinsichtlich der Datenaufnahme, der Registrierung und der Georeferenzierung sind aufgrund der natürlich gewachsenen Vegetation Einschränkungen vorhanden. Durch technische Kenngrößen des Scanners, eine geeignete Standortwahl und die Anpassung an meteorologische und saisonale Bedingungen werden die Restriktionen minimiert.

Während sich in der Holzindustrie bildgebende Messverfahren in den letzten Jahren etabliert haben und zu einer Automation im Prozessablauf beitragen, erfolgt die Datenerfassung im Bestand am stehenden Baum klassisch mit manuellen Methoden. Das terrestrische Laserscanning – als berührungsloses Messverfahren – ermöglicht die Ableitung forstinventurrelevanter Parameter. Zudem haben die erfassten Daten einen hohen Dokumentationswert. Die Anwendung von Methoden der Bildverarbeitung und der Ausgleichsrechnung auf die TLS-Daten führt zu einer präzisen und objektiven Ableitung relevanter Baumparameter.

3 Ziele und Methoden der Forstinventur

In diesem Kapitel werden zunächst die Aufgaben und Ziele einer Forstinventur am Beispiel der Bundeswaldinventur erläutert. In Anschluss daran wird auf die wichtigsten Messinstrumente und Messmethoden, die zur klassischen Datenerhebung eingesetzt werden, eingegangen. Die manuell erhobenen Daten dienen dabei als Referenz zur Validierung der im Kapitel 5 vorgestellten Algorithmen.

3.1 Forstinventur

Eine nachhaltige Bewirtschaftung des Waldes ist seit der Nutzung des Rohstoffes Holz eine der Hauptaufgaben eines Forstbetriebes. Durch nicht vorhersehbare Sturmschäden und biotische Schädlinge sowie durch geplante Durchforstung und Rodung befindet sich der Wald in einem ständigen Wandel. Eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft beinhaltet in periodischen Abständen Forstinventuren als Planungsgrundlage und Kontrolle (Zöhrer, 1980). Auf Stichprobenbasis werden regelmäßig die Waldverhältnisse, der vorhandene Holzvorrat, Bestandsschäden (Stamm- und Wildschaden) und die Artenvielfalt (Biodiversität) dokumentiert. Dabei werden Flächenmerkmale erhoben, Messungen an stehenden Bäumen durchgeführt (Baumhöhe, BHD, Baumposition) und Beobachtungsgrößen, wie u. a. Schäden, Vitalität und Güte, erfasst.

Der Anspruch an den Wald hat sich in den letzten Jahrhunderten stark gewandelt. Ursprünglich fungierte der Wald als Jagd- und Sammelraum. Mit der Industrialisierung vor knapp 150 Jahren wurde das Interesse an der Rohstoffgewinnung geweckt und somit auch das Interesse an nachwachsendem Holz (Hasel & Schwartz, 2002). Gezielt wurden Bestände von schnell wachsenden Nadelbäumen als Monokulturen angepflanzt und eine planmäßige Forstwirtschaft betrieben. Damit die genutzte Menge an Holz nicht den nachgewachsenen Holzvorrat überschreitet, wird eine nachhaltige Bewirtschaftung des Waldes angestrebt. Der wirtschaftliche Nutzen des Waldes ist neben der Schutz- und Erholungsfunktion im Bundeswaldgesetz geregelt. Für viele Tiere bietet der Wald einen natürlichen Lebensraum. Die Aufgaben der Forstbetriebe liegen in der nachhaltigen Bewirtschaftung des Waldes sowie in der Kontrolle und Planung der Waldflächen.

3.1.1 Bundeswaldinventur

Mit 11,1 Mio. Hektar Wald zählt Deutschland zu den walddreichsten Ländern der EU (BWI, 2005). Ende des 19. Jahrhunderts, Anfang des 20. Jahrhunderts wurde der Zustand der deutschen Wälder im 10-Jahres-Rhythmus erhoben. Dabei wurde ein Zuwachs von etwa 10.000 ha pro Jahr dokumentiert (Zundel, 1990). Der Wald unterteilt sich je nach Eigentumsart in Privatwald, Staatswald (Bund/Länder), Treuhandwald und Körperschaftswald, auf diesen Ebenen finden auch die Inventuren statt. Eine Inventur auf Bundesebene ist die Bundeswaldinventur (BWI) die im Abstand von zehn Jahren durchgeführt wird. Erstmals wurde sie in den Jahren 1986 bis 1989 auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt. Zwölf Jahre später, nach der Wiedervereinigung, erfolgte eine zweite BWI (von 2001 bis 2002). Die dritte BWI ist in Vorbereitung und für die Jahre 2011 bis 2012 vorgesehen. Eine Waldentwicklung lässt sich anhand der Folgedaten der 2. BWI ableiten (BWI, 2005). Die Ziele der BWI sind demnach eine großflächige Waldzustandserfassung mit einheitlichen Erfassungsmethoden in periodischen Abständen hinsichtlich des Holzvorrates, der Baumartenverteilung, des Zuwachses und der Holznutzung zur Beurteilung der nachhaltigen Waldbewirtschaftung (BWI, 2005). Die erhobenen Walddaten geben Aufschluss über die Waldentwicklung und deren ökologische Stabilität und finden Berücksichtigung in der Wald- und Klimaforschung.

3.1.2 Inventurverfahren

Die manuellen Datenerhebungen der Forstinventuren basieren auf Stichproben, da eine Vollaufnahme aus Zeit- und Kostengründen nicht zu vertreten ist. Verschiedene Modelle haben sich durchgesetzt und werden je nach Verwaltungsebene in unterschiedlicher Ausdehnung praktiziert. An dieser Stelle soll allerdings nur auf die Datenerhebung im Rahmen der BWI eingegangen werden, die ebenfalls auf Stichproben basiert. In den Eckpunkten eines Grundrasters von 4 km x 4 km (Trakt), ausgerichtet am Gauß-Krüger System, liegen quadratische Stichprobenflächen mit einer Seitenlänge von 150 m (Abbildung 3.1). Diese Stichprobenflächen sind mit der

südwestlichen Traktecke in das Raster eingebunden. Befinden sich die Eckpunkte im Wald, werden an diesen Stellen Probekreise (Plot) mit definierten Radien (1,75 m; 5 m; 10 m; 25 m) eingerichtet. Für jede Traktecke werden in einem 2-Mann-Verfahren Informationen zum Bundesland, zur Zugehörigkeit des Waldes, zur Eigentumsart, die Geländemerkmale sowie eine Winkelzählprobe (WZP) erhoben. Die WZP ist ein Verfahren zur Ermittlung der Anzahl der Bäume innerhalb eines festgelegten Probekreises und wurde 1948 erstmals von Bitterlich (1952) veröffentlicht. Gezählt werden die Bäume, deren BHD breiter als ein in Abhängigkeit vom Proberadius definierter Durchmesser ist. Die Messung der Baumhöhe sowie des BHD wird für jede vorkommende Baumart in der jeweiligen Bestandsschicht des Probekreises durchgeführt. Die restlichen Baumhöhen werden über Einheitshöhenkurven geschätzt. Bei der Erstinventur (bei der BWI II in den neuen Bundesländern) werden die Stichprobenmittelpunkte vermarkt und bei Wiederholungsaufnahmen erneut aufgesucht. Das knapp 1,2 Mio. km lange Waldwegenetz dient in erster Linie der Bewirtschaftung der Wälder (Holzernte). Mit der Durchführung einer Wegeinventur an kreuzenden Wegen entlang der Stichprobengrenze wird die Erschließung der Waldflächen dokumentiert und eine optimale Wegdichte realisiert (BWI, 2005).

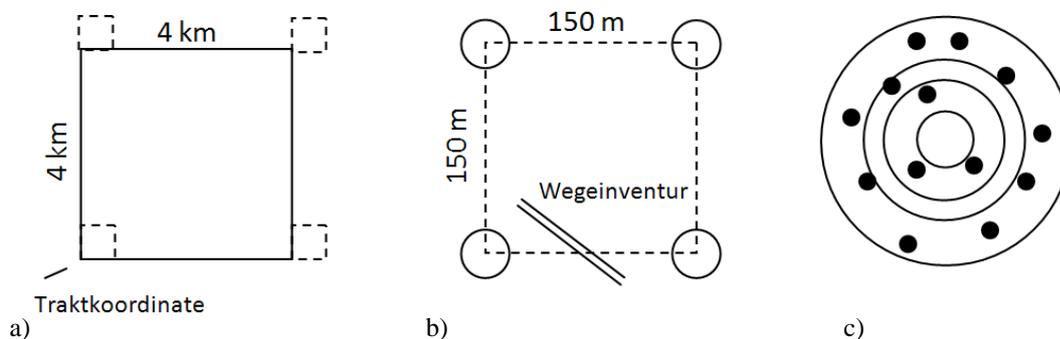


Abbildung 3.1: a) Anordnung der Inventurpunkte in einem Raster von 4 km x 4 km; b) Trakt (Stichprobenfläche), bestehend aus 4 Probekreisen; c) Probekreis mit Winkelzählprobe (Abbildung nach BWI (2005)).

3.2 Methoden zur manuellen Datenerhebung

Die Datenerfassung von geometrischen Kenngrößen am stehenden und liegenden Stamm ist Bestandteil der Waldmesslehre. Neben den Stammholzparametern zur Zuwachs- und Holzvolumenbestimmung spielen auch Kronenparameter eine Rolle. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Kenngrößen (Durchmesser, Baumhöhe, Kronenparameter) von Einzelbäumen erklärt. Baumpositionen zur Beschreibung der räumlichen Struktur sowie orografische Parameter werden ebenfalls vorgestellt.

3.2.1 Stammdurchmesser

Eine Eingangsgröße zur Holzvolumenermittlung ist der Stammdurchmesser d . Die Messung erfolgt bei liegenden Stämmen bzw. an stehenden Bäumen im unteren Stammbereich im direkten Messverfahren mit Hilfe von Kluppen und Umfangmessbändern⁴ (Abbildung 3.2). Eine Kluppe ist eine Art Messschieber mit zwei Schenkeln, die tangential an den Stamm angelegt werden. In größeren Höhen werden Kluppen an Teleskopstangen (Hochkluppen) sowie spezielle Forstmessinstrumente, wie Laserdendrometer (Thurston, 2006), Relaskop, oder sogar fotografische Verfahren (Dehn, 1987; Gaffrey et al., 2001) zur Durchmesserermittlung eingesetzt. Die direkte Messung der Stammdurchmesser entlang des Stammes mit Hochkluppen ist im Vergleich zu den berührungslosen Messungen über Laserdendrometer und photogrammetrische Methoden ein sehr zeit- und arbeitsintensiver Messvorgang, da eine dichte Astausbildung im Kronenbereich die Messung am Stammabschnitt erschweren kann.

⁴ Messband mit Skala zur Durchmesserbestimmung durch Berücksichtigung der Kreisformel.

Bei der Datenerfassung im Bestand für Zwecke der Inventur wird der Durchmesser, auch Brusthöhdurchmesser genannt, in einer einheitlichen Bezugshöhe in 1,30 m Höhe am Stamm gemessen. Bei geneigtem Gelände wird die Höhe am Stamm vom hangaufwärtsliegenden Bodenpunkt abgetragen. Stammanomalien in Brusthöhe in Form von Beulen, Knoten oder geschälten Stammabschnitten werden umgangen, indem der Mittelwert der Durchmessermessungen ober- und unterhalb der Anomalie verwendet wird. Abweichungen des Stammquerschnittes von der Kreisform werden durch eine kreuzweise Kluppung (zwei Messungen mit 90 Grad Versatz) erfasst. Bei einmaligem Durchmesserabgriff hat sich eine einheitliche Ausrichtung der Kluppenschenkel zum Stichprobenzentrum bewährt. Dies gewährleistet, gerade bei ovalen Stammquerschnitten, die Abgriffe an gleichen Stellen und macht diese untereinander vergleichbar in aufeinanderfolgenden Inventurperioden. Die Stammgrundfläche in Brusthöhe (engl. *basal area*) ergibt sich aus der Berechnung einer Kreisgrundfläche mit dem BHD als Eingangsgröße und gibt ebenfalls eine Einschätzung zum bestehenden Holzvolumen. Verwendung findet diese Größe zur Beschreibung der Bestockungsdichte eines Bestandes (Zöhler, 1980). Der Abgriff des Durchmessers erfolgt auf den Millimeter genau mit geringem Druck auf die Kluppenschenkel. Bei großer Krafteinwirkung könnten die Rinden dem Druck nachgeben oder gar abplatzen, sodass ein zu kleiner Durchmesserwert abgelesen wird.

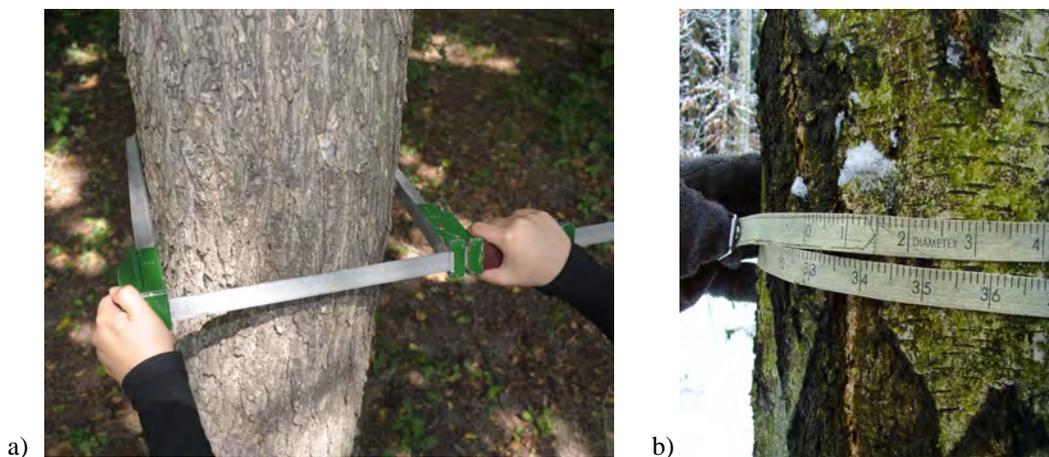


Abbildung 3.2: Durchmessererfassung mit Kluppe (a) und mit Umfangmessband (b) (Foto: b) Anja Schmidt, 2011).

3.2.2 Baumhöhe

Die Baumhöhe h ist das Lot der Baumspitze zum Baumfußpunkt. Bei schräg stehenden Bäumen unterscheidet sich die Baumhöhe somit von der Baumlänge l (Abbildung 3.3 a). Bei Laubbäumen mit einer ausgeprägten Krone ist die Baumspitze der Durchstoßpunkt der verlängerten Stammachse mit der Krone (Bundesanzeiger, 2000). Im Laufe der Jahre wurden aufgrund der Entwicklung der Messinstrumente verschiedene Messverfahren eingesetzt. Ein Überblick über die Messmethoden und deren Genauigkeiten ist in Rössler (2000) zu finden, von ihnen werden hier die wichtigsten Methoden genannt.

In den Anfängen der Baumhöhenmessung wurden die Höhen direkt über Messlatten oder Messbänder abgegriffen. Diese Methoden waren zeit- und arbeitsaufwendig, da eine Einweisung durch eine zweite Person bzw. das Besteigen der Baumkrone notwendig war. Teleskopmesslatten kommen heute bei kleineren Bäumen dennoch zum Einsatz. Ab den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden Messinstrumente verwendet, die die Höhenmessung nach dem trigonometrischen Prinzip durchführen. Über die Horizontalabstand s zum Baum und die zwei Vertikalwinkel β_h zur Baumspitze und β_f zum Baumfußpunkt wird die Baumhöhe berechnet (Abbildung 3.3 b). Weiterentwicklungen dieser analogen Messinstrumente mit Entfernungsmessern mit Ultraschall-Messprinzip oder elektro-optischem Messprinzip stellen einen Sprung in der Genauigkeitssteigerung der Höhenmessung dar. Jablko & Perlwitz (1997) geben einen Vergleich der gängigen Baumhöhenmessgeräte, bei dem ein Ultraschallhypsometer am besten abschneidet. Bei Sichtbarkeit der Baumspitze, des Baumfußpunktes und des Stammes ist die Höhenmessung von jeder Entfernung aus in kürzester Zeit durchführbar. Die Einschätzung der Baumspitze, gerade bei dichten Laubkronen, ist eine subjektive

Bewertung, die zu Messabweichungen vom Mittelwert von knapp ± 3 m führt, während Messungen an Nadelbäume um $\pm 0,4$ m um den Mittelwert schwanken (Rössler, 2000). Höhenmessungen an stehenden Nadelbäumen sind aufgrund der ausgeprägten Baumspitze weniger fehlerbehaftet.

Eine weitere verbreitete Möglichkeit ist die Schätzung von Baumhöhen mit Hilfe von Einheitshöhenkurven, die die Beziehung zwischen Durchmesser und Stamm beschreibt (Gadow, 2003). Dazu werden neben dem Durchmesser des zu schätzenden Baumes der Durchmesser und die Höhe des Mittel- oder Oberhöhenstammes verwendet. Über baumartenspezifische Modelle wird dann die Baumhöhe geschätzt.

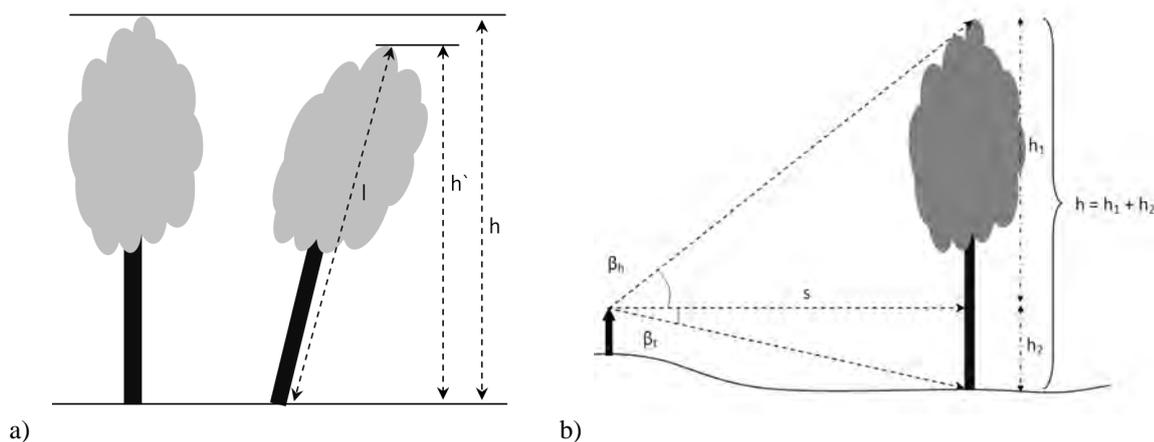


Abbildung 3.3: a) Auswirkung der Baumhöhe bei Schrägstand; b) Prinzip der trigonometrischen Höhenmessung.

3.2.3 Kronenparameter

Die Baumkrone ist neben Lebensraum und Nahrungsquelle für Lebewesen ein wichtiger Indikator für die Vitalität eines Baumes. Aus der Beschaffenheit und Dichte der Blätter und Nadeln lassen sich Rückschlüsse auf ein eventuelles Krankheitsbild des Baumes ziehen. Abbildung 3.4 stellt die wichtigsten Kronenparameter grafisch dar. Die Kronenansatzhöhe k_{ah} und der Kronenumfang k_u lassen sich durch Messungen direkt bestimmen. Der Kronenradius k_r , die Kronenbreite k_b und Kronenlänge k_l sowie die Kronenschirmfläche k_s hingegen werden indirekt aus dem Kronenumfang und der Kronenansatzhöhe bestimmt. Der obere Kronenteil bis zur breitesten Kronenstelle ist dem Licht zugewandt und wird als Lichtkrone bezeichnet. Demnach ist der untere Kronenteil die Schattenkrone.

Über trigonometrische Höhenmessung wird die Kronenansatzhöhe bestimmt. Bei Laubbäumen ist der Kronenansatz in Höhe der Austriebsstelle des ersten grünen, vom Stamm abgehenden Astes (Primärast) definiert. Nadelbäume haben ihren Kronenansatz an der untersten, aus mindestens drei grünen Ästen sich bildenden Astgruppe (Quirl). Folglich ergibt sich die Kronenlänge aus der Differenz der Baumhöhe und der Kronenansatzhöhe:

$$k_l = h - k_{ah} \quad (3.1)$$

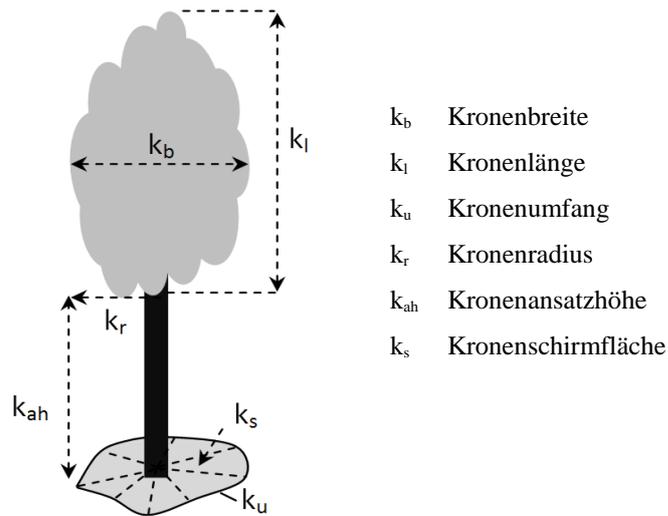


Abbildung 3.4: Kronenparameter.

Durch Ablotung der äußersten Baumkrone an acht nach der Himmelsrichtung ausgerichteten Punkten wird über das Umringspolygon der Kronenumfang k_u bestimmt. Die Maximalausdehnung des Polygons entspricht der Kronenbreite k_b bzw. dem zweifachen Kronenradius k_r . Ein eigens für die Ablotung angefertigtes Instrument ist der Kronenspiegel (Abbildung 3.5). Er ist ausgestattet mit einem kardanisch aufgehängtem Lotrohr, Spiegel und Zielkreuz. Mit ihm ist eine Ablotung im Genauigkeitsbereich von ± 5 cm (Dippel, 1988) möglich. Zur Bestimmung der Kronenschirmfläche gibt es verschiedene Verfahren. Eine Möglichkeit ist die Aufsummierung der in Dreiecke aufgeteilten Fläche. Eine andere Methode ist das Teilkreismodell. Über Mittelbildung zweier benachbarter Radien (am Lotungspunkt) werden Teilkreise berechnet, die aufsummiert die projizierte Kronenschirmfläche ergeben. In Kramer & Akça (2008) ist eine Zusammenstellung der Kronenparameter mit weiteren ableitbaren Parametern, wie Kronenexzentrizität und Ausladungsverhältnis, gegeben.



a)



b)

Abbildung 3.5: Kronenspiegel (Fotos: Anja Schmidt, 2011).

3.2.4 Baumposition

Die Angabe der Baumposition ist neben den holzvorratsbestimmenden Parametern eine wichtige Größe bei Inventuren zum Identifizieren der Bäume in aufeinanderfolgenden Inventurperioden. Ein Vergleich der manuell erhobenen Daten mit photogrammetrisch erfassten Daten (z. B. Laserscans, Orthophotos) wird durch homologe Baumpositionen ermöglicht. Ein Vergleich zweier Inventurperioden, z. B. hinsichtlich des Biomassezuwachses, wird durch eine dauerhafte Vermarkung (Eisenrohre) und Aufmessung der Plotzentren in einem übergeordneten Koordinatensystem realisiert. Mit Hilfe von Forstkarten, GPS-Empfängern und Metalldetektoren lassen sich die Traktecken der Inventurpunkte auffinden und können einer erneuten Inventur unterzogen werden. Während im Zuge der Waldinventur Polarkoordinaten erhoben werden, sind für flächendeckendere Auswertungen und große Gebiete kartesische Baumpositionen in lokalen oder gar georeferenzierten Koordinatensystemen von Vorteil.

Die Polarkoordinaten setzen sich aus der Horizontaldistanz s und dem Azimut α der einzelnen Bäume, gemessen vom Plotzentrum, zusammen. Beide Parameter beziehen sich auf den Baummittelpunkt und werden ebenfalls in Brusthöhe gemessen. Zur Ermittlung der Horizontaldistanz werden klassische Messbänder zunehmend von elektro-optischen und Ultraschall-Distanzmessern ersetzt. Die Vorteile liegen in der schnellen, unkomplizierten, unterholzunabhängigen und teilweise mit nur einer Person durchführbaren Messmethode. In Beständen mit einer dichten Strauchschicht liefern Ultraschall-Distanzmesser zuverlässigere Messergebnisse als elektro-optische Distanzmesser, da sie gegenüber Strahlunterbrechung robuster sind (Jablko & Perlwitz, 1997). Meistens jedoch reicht eine dezimetergenaue Distanzmessung aus, um die Bäume in zwei aufeinander folgenden Inventuren zu identifizieren. Das Azimut ist der eingeschlossene Winkel der Nord- und Stammrichtungsmessung und wird in der Einheit Gon angegeben. Zur Bestimmung der Nordrichtung bzw. des Azimuts werden Kompass mit Peilvorrichtungen verwendet.

3.2.5 Gelände

Die forstliche Standortkartierung mit der Dokumentation der örtlichen Besonderheiten hinsichtlich Klima, Vegetation, Boden und Lage ist Voraussetzung für eine zielgerichtete, differenzierte Forstwirtschaft (Zundel, 1990). Die Bodenbeschaffenheit wird im Zuge der Waldinventur ebenfalls erfasst. Dabei erfolgt die Beschreibung des Stichprobengebietes durch Dokumentation der Geländeneigung und der Geländeexposition. Beide Messwerte sind lokal zu betrachten und beziehen sich auf das Stichprobengebiet. Während die Neigung die Stärke des Gefälles angibt, beschreibt die Exposition die Orientierung des Gefälles zur Himmelsrichtung. Beide geländespezifischen Parameter werden mit einer Bussole (Peilkompass) mit integriertem Klinometer (Neigungsmesser) bestimmt.

Neben der Ausrichtung spielt die Geländeform der Stichprobenfläche ebenfalls eine Rolle. Das Gelände kann neben ebenen Formen auch eine konvexe oder konkave Gestalt annehmen (z. B.: Kuppe, Rücken, Sattel). Allerdings beziehen sich die erwähnten Geländeformen eher auf größere Gebiete und sind global zu betrachten. Da das Stichprobengebiet eine verhältnismäßig kleine Fläche umfasst, werden lokale Inhomogenitäten dokumentiert.

3.3 Messinstrumente im Forst

Zur standardmäßigen Ausrüstung eines Inventurtrupps gehören neben Dokumentationsunterlagen Messinstrumente zur Höhen- und Längenmessung, Winkelmesser und Fluchtstäbe. Noch Mitte bis Ende des letzten Jahrhunderts waren für die Erfassung verschiedener Baum- und Geländeparameter unterschiedliche mechanische Messinstrumente nötig. Klassische Messinstrumente wie Messband, Kluppe, Kompass, Klinometer oder einfache Strahlensatzinstrumente zur Bestimmung von Winkeln und Höhen werden zunehmend von modernen, allseitig einsetzbaren Messinstrumenten ersetzt. Messinstrumente mit integrierten Sensoren zur Distanz- und Neigungsmessung und mit Visiereinrichtung zum Anzielen von Einzelbäumen erleichtern die Messung von Entfernungen, Durchmesser, Baum- und Kronenansatzhöhen.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die klassischen Forstmessinstrumente und deren Einsatzbereiche bei der Ableitung der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Inventurparameter.

Tabelle 2: *Klassische Forstmessinstrumente.*

	Horizontal- entfernung	Azimut	Gelände- neigung	Stammdurch- messer	Baumhöhe/ Kronen- ansatzhöhe	Kronen- parameter
Kompass		x				
Klinometer		x	x			
Kluppe				x		
Messband	x			x		x
Relaskop	x		x	x	x	
Dendrometer	x		x	(x)	x	
Kronenspiegel						x

4 Datenerfassung und Messinstrumente

Wie die vorangegangenen Kapitel gezeigt haben, ist eine regelmäßige Kontrolle von Forstbeständen in Form einer Inventur eine wichtige und anspruchsvolle Aufgabe. Das TLS als effizientes und berührungsloses Messverfahren stellt eine geeignete Datenerfassungsmethode für einen Teil der geforderten Aufgaben im Bereich der Forstinventur dar. Dazu wurden geeignete Studienggebiete mit einem terrestrischen Laserscanner aufgenommen, die später in der Arbeit die Grundlage der automatischen Extraktion der Baumparameter bilden. Deshalb beschäftigt sich das nachfolgende Kapitel mit der Datenerfassung der Studienggebiete. Neben der Bestandsbeschreibung der Studienggebiete und deren Datenaufnahme mit einem terrestrischen Laserscanner werden die verwendeten Laserscanner vorgestellt und eine Kurzbeschreibung der technischen Kenngrößen gegeben.

4.1 Studienggebiete

Die Daten, die dieser Arbeit zu Grunde liegen und auch Gegenstand der Analysen in Abschnitt 7 sind, stammen aus drei Studienggebieten. Zwei Studienggebiete liegen in Sachsen (Tharandter Wald) und das dritte befindet sich in Österreich (Wiener Wald). Zusätzlich wurden manuelle Daten erhoben, die später zur Validierung der Algorithmen dienen. Diese wurden konsequent von einer Person im jeweiligen Studienggebiet gemessen. Prinzipiell wurden die Stammdurchmesser der Studienggebiete klassisch mit Kluppen erfasst. Dabei wurden die Schenkel zum Standpunkt des Scanners ausgerichtet, um sicherzugehen, dass bei ovalen Stämmen der Durchmesser als Referenz dient, welcher vom Scanner aus sichtbar ist. Die Baumhöhen wurden nach dem trigonometrischen Prinzip mit einem Ultraschallmessgerät mit Transponder erfasst. Aufgrund der räumlich verteilten Gebiete und des zeitlichen Versatzes der Datenerhebung sind die Aufnahmepersonen der Studienggebiete untereinander nicht einheitlich. Dieser Aspekt ist bei der Datenanalyse zu berücksichtigen. Wird in der Arbeit auf andere Datensätze zurückgegriffen, wird dies im Text erwähnt und eine Kurzcharakteristik des Gebietes und der Datenaufnahme an geeigneter Stelle gegeben.

4.1.1 Tharandter Wald

Der Tharandter Wald liegt ca. 15 km südwestlich von Dresden in Sachsen und hat knapp 6.000 ha Waldfläche. Von Winter 2005 bis Herbst 2010 wurden verschiedene Stichprobengebiete manuell und mit dem Laserscanner aufgenommen. Zwei Untersuchungsgebiete, ein Buchenbestand und ein Fichtenbestand mit Lichtung (Abbildung 4.1), sollen hier näher erläutert werden. Neben den aufgenommenen TLS-Daten und den manuell erfassten Daten standen für den Bereich auch Flugzeuglaserscannerdaten zur Verfügung.

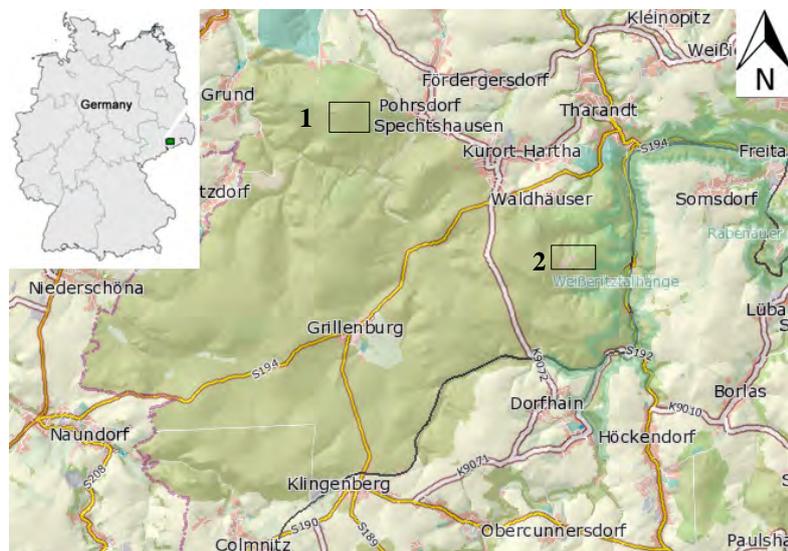


Abbildung 4.1: Studienggebietsverteilung im Tharandter Wald; 1) Buchenbestand; 2) Fichtenbestand (Karte: *b@siskarte sachsen* © Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen 2013).

4.1.1.1 Buchenbestand

Westlich des Landberges, der nördlichen Erhebung des Tharandter Waldes, befindet sich das erste Studiengebiet (50° 59' 38" N; 13° 29' 34" O; 392 m ü. NN). Das aufgenommene Stichprobengebiet ist Bestand-teil eines 145 Jahre alten Buchenreinbestandes (*Fagus sylvatica*). Das Gelände hat eine Neigung von 6 ° und ist nach Süden exponiert. Die mittleren Bestandsparameter wurden aus den untersuchten Bäumen abgeleitet und belaufen sich für den mittleren BHD auf 32,9 cm und für die mittlere Baumhöhe auf 29 m. Eine umfassendere Darstellung weiterer Parameter des Bestandes ist in Spank (2010) gegeben.

TLS-Datenakquisition

Im Winter 2005 (unbelaubt und mit Schnee bedeckt) sowie im März 2007 (unbelaubt) wurde eine 30 m x 30 m große Fläche von jeweils drei Standpunkten mit dem Riegl LMS-Z420i gescannt. Bei der ersten Datenerfassung bildeten die Scannerstandpunkte ein Dreieck, die das Studiengebiet mit einem Radius von 15 m einschlossen. Bei der zweiten Datenaufnahme wurden neben einem zentralen Standpunkt im Stichprobenzentrum zwei weitere diametral außerhalb verteilt. Die Registrierung der Standpunkte erfolgte über zuvor verteilte retro-reflektierende Zylinder auf ausziehbaren Reflektorstäben. Die mittlere Scanauflösung betrug 0,07 °. Die BHD wurden in zwei kreuzweise zueinander ausgerichteten Kluppenstellungen bestimmt. Die Baumpositionen wurden klassisch mit einem Messband und einem Kompass ermittelt.

4.1.1.2 Fichtenbestand

Das zweite Studiengebiet liegt im östlichen Teil des Tharandter Waldes (50° 57' 43" N; 13° 33' 52" O; 380 m ü. NN) und umfasst eine 50 m x 90 m große Lichtung, den Wildacker, sowie die Anker-Station Tharandter Wald (ASTW). Die ASTW wird seit 1958 vom Institut für Hydrologie und Meteorologie betrieben und liefert kontinuierlich meteorologische und hydrologische Messdaten. Zum Zeitpunkt der Datenaufnahme waren vier Messtürme zwischen 30 m und 42 m Höhe (1 permanenter und 3 temporäre Türme) für meteorologische Messungen im Studiengebiet aufgebaut. Die Türme standen in einer Flucht mit einem mittleren Abstand von 55 m zueinander (Abbildung 4.2).

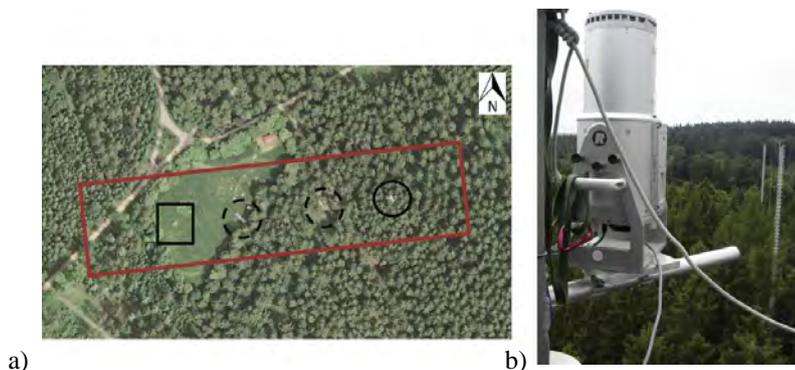


Abbildung 4.2: a) Fichtenbestand und Wildacker mit 4 Türmen (v.l.n.r.: Teleskopmast $h = 30$ m, Gittermast 1 $h = 40$ m, Gittermast 2 $h = 40$ m, Hauptturm $h = 42$ m) und dem Untersuchungsgebiet (großes Rechteck); b) Riegl LMS-Z420i auf dem Hauptturm mit Blick nach Westen (Quelle: a) ATKIS®-DOP © Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen 2013; b) Ronald Queck, 2008).

Den Hauptanteil des Untersuchungsgebietes machen Nadelbaumgewächse mit 72 % Fichten (*Picea abies*), 15 % Kiefern (*Pinus sylvestris*) und 10 % Lärchen (*Larix decidua*) aus. Die restlichen 3 % sind Laubbaumgewächse, wie Birke und Buche (*Betula spec.*, *Fagus sylvatica*), die hauptsächlich am Rand der Lichtung vorzufinden sind (Grünwald & Bernhofer, 2007). Die Fläche östlich der Lichtung ist mit einem 124 Jahre alten Fichtenreinbestand bestockt. Der Bestand weist eine Dichte von 335 Bäumen pro Hektar auf mit einer mittleren Baumhöhe um den Hauptturm von 31 m und einem mittleren BHD von 36 cm. Weitere Bestandsparameter sind in Grünwald & Bernhofer (2007) aufgeführt.

TLS-Datenakquisition

Die Datenaufnahme erstreckte sich über drei Messtage von Sommer 2008 bis Herbst 2010. An einem windstillen Tag im Sommer 2008 wurde ein Transekt von 250 m x 60 m, ausgerichtet an der Turmlinie, aufgenommen (Abbildung 4.3). Von den insgesamt acht verschiedenen Laserscannerpositionen wurden sechs mit dem Riegl LMS-Z420i und zwei mit dem Faro LS 880 erfasst. Eine Aufnahme von dem 42 m hohen Hauptturm ermöglichte eine flächendeckende Erfassung des Kronendaches von oben. Im Herbst 2008 wurden erneut fünf Laserscans mit dem Riegl LMS-Z420i im laubfreien Zustand durchgeführt, die sich auf der Lichtung und dem Weg im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes befanden. Die mittlere Scanauflösung betrug $0,1^\circ$. Über retro-reflektierende Zylinder wurde die Registrierung der einzelnen Laserscannerstandpunkte in ein einheitliches Koordinatensystem durchgeführt. Die Daten des Faro-Scanners wurden über natürliche markante Punkte im Bestand (Äste, Ecken von Schildern und Nistkästen) in das übergeordnete Koordinatensystem des Scanners transformiert. Letztendlich wurde der Ursprung des Projektkoordinatensystems in eine Ecke der Bodenplatte des Hauptturms gelegt und die X-Achse entlang der Verbindungslinie der Türme ausgerichtet. Die Y-Achse ergibt sich bei Vervollständigung des Rechte-Hand-Systems rechtwinklig dazu. Retro-reflektierende Zielmarken wurden an den fest installierten Messeinrichtungen auf der Lichtung angebracht und ermöglichen die Überführung späterer Datenaufnahmen in das selbe Koordinatensystem.

Im Herbst 2010 wurde die Lichtung von zwei weiteren Standpunkten aus aufgenommen. Einer dieser Standpunkte wurde vom 40 m hohen Gittermast 1 ausgeführt. Dieser Standpunkt lieferte eine bessere Sicht auf die Kronen hinter der Lichtung, die vom Hauptturm aus nicht sichtbar waren. Die mittlere Scanauflösung lag hier bei $0,07^\circ$.

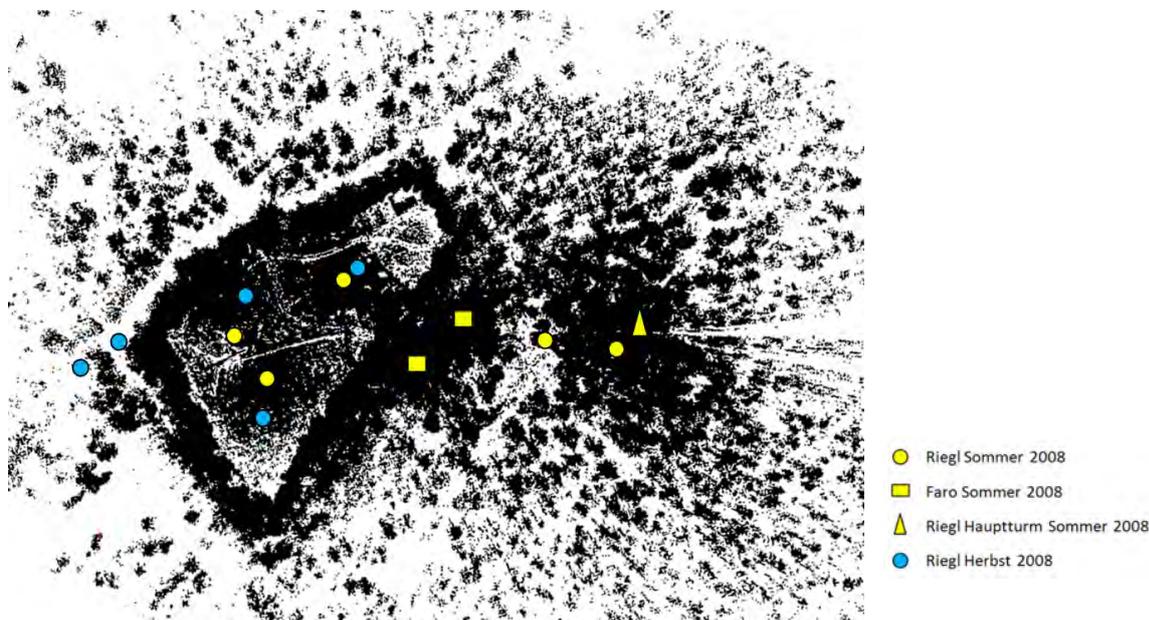


Abbildung 4.3: Ausgedünnte Punktwolke der Sommeraufnahme mit Standpunkten von Sommer 2008 (gelb) und Herbst 2008 (blau).

Flugzeuglaserscannerdaten

Für die Untersuchungsgebiete im Tharandter Wald liegen Rohdaten einer Laserscannerbefliegung⁵ mit First-Pulse und Last-Pulse-Echos vor. Diese wurden im Frühjahr 2006 mit einem Laserscanner Riegl LMS-Q560 aufgenommen und haben eine mittlere Punktdichte von 1,3 bis 1,9 Pkte/m². Der Laserscanner erfasst die reflektierten Echos nach dem Impulslaufzeitverfahren, er hat eine Laserpulsrate von 240 kHz und eine Datenrate von 160 kHz (Riegl, 2010). Der mittlere Punktfehler in der Höhe wird vom Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen mit 0,2 m und

⁵ bezogen vom Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

in der Lage mit 0,5 m angegeben. Die Daten liegen im amtlichen Lagereferenzsystem des Freistaates Sachsen DE_RD/83/3GK (Rauenbergdatum 1983; Gauss-Krüger Koordinatensystem mit 3 ° Streifen) und im Höhenreferenzsystem DHHN92 vor (GeoSN, 2010).

4.1.2 Wiener Wald

4.1.2.1 Bestandsbeschreibung

Im Mai 2006 wurden im Rahmen einer Studie für die Firma TreeMetrics Ltd. 26 runde Stichprobengebiete mit einem Radius von 15 m im Wiener Wald aufgenommen. Der Wiener Wald erstreckt sich westlich von Wien und umfasst eine Fläche von ca. 106.000 ha. Von den aufgenommenen Stichprobengebieten waren zwölf Mischbestände aus Laub- und Nadelbäumen, sechs reine Buchenbestände, zwei reine Fichtenbestände und jeweils drei gemischte Laub- bzw. Nadelbaumbestände. Zum Zeitpunkt der Aufnahme hatten die Bestände ein Alter zwischen 35 und 140 Jahren.

4.1.2.2 TLS-Datenakquisition

Die Stichprobengebiete wurden mit einem GPS-Handheld aufgesucht und die TLS-Standpunkte an frühere Inventurpunkte angepasst. Mit einem Faro LS 880 wurden Plots im Single-Scan-Modus mit einer Scanauflösung von 0,045 ° aufgenommen. Aufgrund der rotierenden Spiegelachse des Scanners wird ein Über-Kopf-Scannen ermöglicht und mit nur einem Standpunkt die Umgebung nahezu kugelförmig dokumentiert. Die Erhebung der Baumhöhe, der Baumposition und des BHD erfolgte im Umkreis von 15 m durch Methoden der Waldinventur. Von den Bäumen, die im Verfahren der Winkelzählprobe gezählt wurden, wurde der BHD bestimmt sowie eine trigonometrische Höhenmessung für den Grundflächenmittelstamm pro Baumart ermittelt. Die Baumhöhen der restlichen Vertreter jeder Baumart wurden über Einheitshöhenkurven geschätzt.

4.1.3 Tabellarische Gegenüberstellung der Studiengebiete

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Bestandscharakteristik und die Datengrundlage der in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Studiengebiete.

Tabelle 3: Übersicht über die Studiengebiete (die Bestandsdaten des Fichtenbestandes sind Grünwald & Bernhofer (2007) und die Daten des Buchenbestandes Spank (2010) entnommen).

	Tharandter Wald		Wiener Wald	
	Fichtenbestand	Buchenbestand		
Bestandsbeschreibung	Geografische Lage	50°57'49" N 13°34'01" O 380 m ü. NN	50°59'38" N 13°29'34" O 392 m ü. NN	ca. 48°12' N ca. 16°10' O ca. 400 m ü. NN
	Baumarten	72 % Fichte, 15 % Kiefer, 10 % Lärche, 3 % andere	Buche	Rein- und Mischbestände
	Alter	124 Jahre	145 Jahre	35 – 140 Jahre
	Mittlerer BHD	36 cm	33 cm	39 cm
	Mittlere Baumhöhe	31 m	29 m	27 m
	Gebietsausdehnung	250 m x 60 m	30 m x 30 m	Radius 15 m
	Datenaufnahme	Scankonfiguration	Multiple-Scan-Modus	Multiple-Scan-Modus
Mittlere Scanauflösung		0,07 °	0,07 °	0,045 °
Laserscanner		Riegl LMS-Z420i, Faro LS 880	Riegl LMS-Z420i	Faro LS 880
Manuelle Daten		ja	ja	ja
ALS-Daten		ja	ja	nein

4.2 Terrestrische Laserscanner

Für die Erfassung der in 4.1 vorgestellten bewaldeten Testgebiete wurden 2 verschiedene Laserscanner eingesetzt. Zum einen der Riegl LMS-Z420i als Vertreter des Impulslaufzeitverfahrens und zum anderen der Faro LS 880 Laserscanner, der auf Basis des Phasenvergleichs Distanzen bestimmt. Die folgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick über die Messsysteme und deren Spezifikationen. Im Anhang A.2 sind die technischen Details tabellarisch zusammengefasst.

4.2.1 Riegl LMS-Z420i

Der Riegl LMS-Z420i (Abbildung 4.4) verwendet das Impulslaufzeitverfahren zur Distanzmessung. Die maximale Reichweite für an natürlichen Oberflächen reflektierten Punkten mit einer Reflektivität $\geq 80\%$ liegt laut Herstellerangabe bei 1.000 m und bei einer Reflektivität $\geq 10\%$ bei 350 m. Trotz eingeschränktem Gesichtsfeld ($80^\circ \times 360^\circ$) kann der Scanner über eine Kippvorrichtung mit nur drei Aufnahmen unter Ausnutzung des kompletten Aufnahmebereiches das Umfeld vollsphärisch erfassen (mit Verdeckungen im Bereich des Stativs). Der Scanner kann in 5° -Schritten um seine Kippachse verschwenkt werden. Diese Positionen können vorab in einer 4×4 -Transformationsmatrix kalibriert werden, sodass eine Registrierung zweier zueinander verschwenkter Scannerstellungen desselben Standpunktes ohne Zielmarken durchführbar ist. Über einen rotierenden

Polygonradspiegel werden die Laserimpulse in konstanten Winkelabständen mit 11.000 Hz abgelenkt. Bei sehr hochauflösenden Scans mit einem geringen Punktabstand werden die Laserimpulse über eine oszillierende Spiegelbewegung zum Objekt ausgesendet. Der Laserstrahl hat eine Strahldivergenz von 0,25 mrad (Riegl, 2009).

Über einen extern angeschlossenen Laptop wird der Scanner über LAN oder WLAN gesteuert. Dazu wird die Steuersoftware *RiSCAN PRO* verwendet, die neben der Steuerung und dem Setzen aller Scanparameter auch das Editieren, Registrieren und Exportieren der Scans ermöglicht. Über das Einfärben der Punktwolke mit Fotos einer Digitalkamera, die auf dem Scanner optional befestigt werden kann, ist eine photorealistische Darstellung möglich.



Abbildung 4.4: Laserscanner Riegl LMS-Z420i (Riegl, 2009).

4.2.2 Faro LS 880

Der Faro LS 880 (Abbildung 4.5) arbeitet im Vergleich zum Riegl LMS-Z420i mit dem Phasenvergleichsverfahren. Daraus ergeben sich Unterschiede in den Spezifikationen, die sich in einer geringeren Reichweite bis 76 m und einer höheren Distanzmessgenauigkeit von 3 mm widerspiegeln. Die Laserimpulse werden mit 120.000 Hz und einer Wellenlänge von 785 nm ausgesendet. Durch eine rotierende Spiegelachse wird ein Scanbereich von $320^\circ \times 360^\circ$ abgedeckt. Beim Austritt ist der Laserimpuls 3 mm breit und hat eine Strahldivergenz von 0,25 mrad. Über das Bedienfeld am Gehäuse werden die Scaneinstellungen ohne zusätzlichen externen PC vorgenommen und Scans können gestartet werden. Optional kann ein Laptop angeschlossen werden, um den Scanvorgang in Echtzeit auf dem Display zu verfolgen. Auch hier ist über eine Befestigungsvorrichtung die Aufnahme von Kamerabildern aus annähernd derselben Position wie von Sende- und Empfangseinheit realisierbar (Faro, 2005).



Abbildung 4.5: Laserscanner Faro LS 880 (Faro, 2005).

5 Methoden zur Ableitung forstinventurrelevanter Baumparameter

In diesem Kapitel werden Methoden aufgezeigt, die eine Ableitung forstinventurrelevanter Parameter aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken ermöglichen. Dabei werden bereits bestehende Methoden sowie neue Ansätze vorgestellt. Ferner lässt sich durch Aneinanderreihung der Algorithmen der Ableitungsprozess automatisieren, was in dem Softwarepaket *Autostem Forest™* der Firma TreeMetrics Ltd. umgesetzt wurde. Die folgende Abbildung (5.1) stellt die wichtigsten Baum- und Plotparameter grafisch dar, die bestimmbar sind.

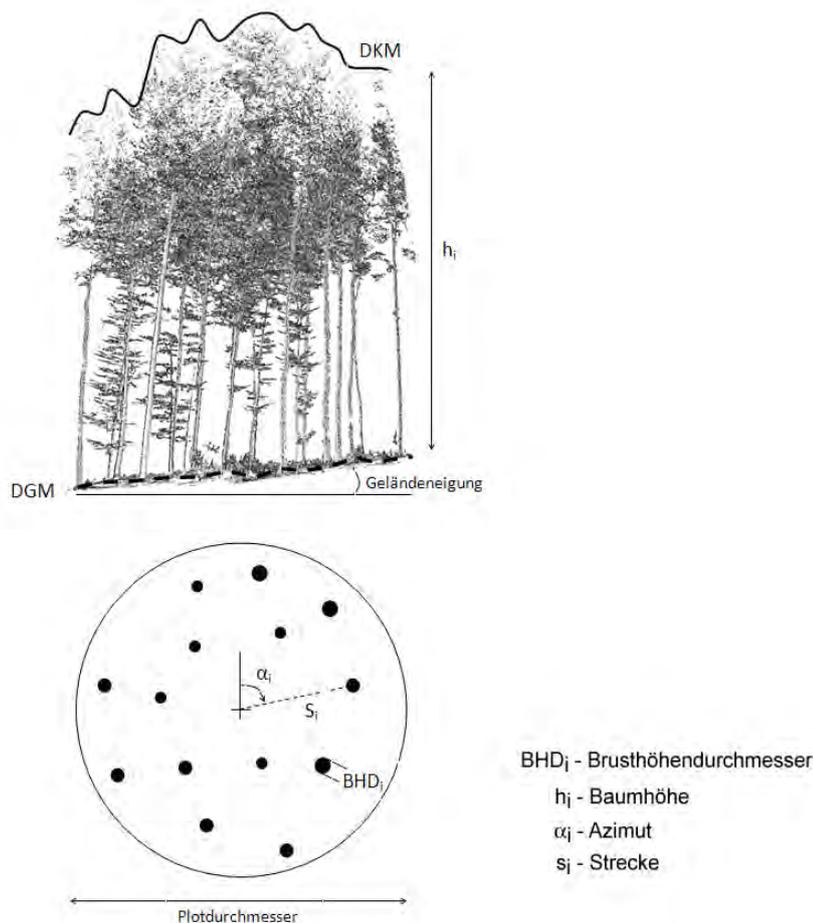


Abbildung 5.1: Baum- und Plotparameter der plotweisen Inventuraufnahme in Seiten- und Draufsicht.

5.1 Vorverarbeitung

Die Prozessierung der Daten bezieht sich auf einen runden Plotausschnitt. Durch Angabe eines inneren und eines äußeren Radius r_i und r_A wird die Punktwolke auf die zu prozessierende Größe zurechtgeschnitten. Über eine Abstandabfrage definieren alle Punkte, die sich innerhalb der inneren und äußeren Plotgrenze befinden, das Studiengebiet. Der Wert des inneren Radius ist standardmäßig auf 0 gesetzt. Ein Setzen dieses Wertes bringt eine erste Filterung bezüglich der Baumentfernung (Ringförmiges Studiengebiet).

In einem zweiten Vorverarbeitungsschritt wird eine Filterung durchgeführt, die vereinzelte Streupunkte über den Baumkronen eliminiert. Dazu wird ein Würfel der Kantenlänge s_w (z. B. $s_w = 2$ m) definiert, der alle Punkte ab einer bestimmten Höhe anfährt und prüft, ob sich innerhalb der Würfelgrenzen weitere Punkte befinden. Ist die Anzahl kleiner als ein Grenzwert n_{max} (z. B. $n_{max} = 5$), werden die Punkte gelöscht.

5.2 Digitale Oberflächenmodelle

Zur Beschreibung der Topographie der Erdoberfläche werden verschiedene Modelle eingesetzt. Das digitale Geländemodell beschreibt die reine Erdoberfläche ohne Kunstbauten und Vegetation. Werden die Objekte auf der Erdoberfläche mit einbezogen, spricht man von digitalen Oberflächenmodellen (DOM). In Bereichen ohne künstliche und natürliche Objekte entspricht das DGM dem DOM (Pfeifer, 2005). Speziell in bewaldeten Gebieten, wo die Oberfläche aus aneinandergereihten Baumkronen besteht, wird zusätzlich von einem digitalen Kronenmodell (DKM) gesprochen. Verschiedene Filteralgorithmen, die teilweise aus der Bildverarbeitung abgeleitet wurden, haben sich zur Generierung dieser Modelle aus unorganisierten Punktwolken durchgesetzt. Über das Verfahren der robusten Filterung, wie es in Kraus & Pfeifer (2002) vorgestellt wird, werden DGM und DOM über das Einpassen von Trendflächen abgeleitet. Die Analyse sowie entsprechende Gewichtung der negativen sowie positiven Abweichungen von Polynomflächen führt zur iterativen Filterung. Einen Überblick über die geläufigsten Filtermethoden geben Pfeifer (2005) sowie Briese et al. (2010). Das DGM und das DKM bilden den Schwerpunkt der folgenden Unterabschnitte. Dabei handelt es sich jeweils um ein Rastermodell mit Rasterhöhen, die sich auf die Mittelpunkte der Zellen beziehen.

5.2.1 Digitales Geländemodell

5.2.1.1 Filterung

Zur automatischen Ableitung aller weiteren Baumparameter wird aus der Punktwolke zunächst das DGM erstellt. In konstanten Abständen parallel zu der X - und Y -Achse, die der Rasterweite s_r des Modells entsprechen, wird ein vertikal stehender Quader in das Koordinatensystem der Punktwolke eingepasst. Der tiefste Punkt innerhalb des Quaders definiert zunächst die Höhenkoordinaten Z des Rasterzellenmittelpunktes (X, Y) (Minimumfilter).

Diese einfache Filtermethode führt bei Punktwolken mit Streupunkten unterhalb der Geländeoberfläche⁶ zu falschen Rasterhöhen. Um dies zu umgehen, wird in konstanten Abständen entlang der Z -Achse die Punktdichte analysiert. Die Höhe mit dem größten Dichteaufkommen entspricht der Geländehöhe und wird als Rasterhöhe definiert (Abbildung 5.2). In Single-Scan-Aufnahmen eines Bestandes werfen die Bäume Scanschatten, die im Bereich des Bodens keine Punkte enthalten. So führt das tiefste lokale Maximum der Punktdichte über dem Gelände zu einem prognostizierten Bodenpunkt. Weicht dessen Punkthöhe um mehr als 2 m von dem Mittel seiner acht Nachbarhöhen ab, wird als Rasterhöhe der Medianwert seiner Nachbarpunkte gesetzt, andernfalls liegt eine richtige Höhe des Rasterpunktes vor. Mit einem anschließenden Median-Filter werden die Punkte über dem Gelände geglättet. Das Verfahren eignet sich besonders gut für Walddaten, da die stärkste Punktdichte immer in Bodennähe zu erwarten ist. Problematisch wird die Anwendung bei Datensätzen im urbanen Raum mit Brücken und Unterführungen.⁷

⁶ Laserscanner, die ein Phasenvergleichsverfahren nutzen, erzeugen Streupunkte aufgrund von Mehrdeutigkeiten des Signals. Gegebenenfalls können auch Effekte von Doppelreflektionen in Streupunkten resultieren.

⁷ Das Verfahren der DGM-Generierung über die Punktdichte wurde von Steffen Scheller (ehemaliger Mitarbeiter des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden) entwickelt und in C++-Code implementiert.

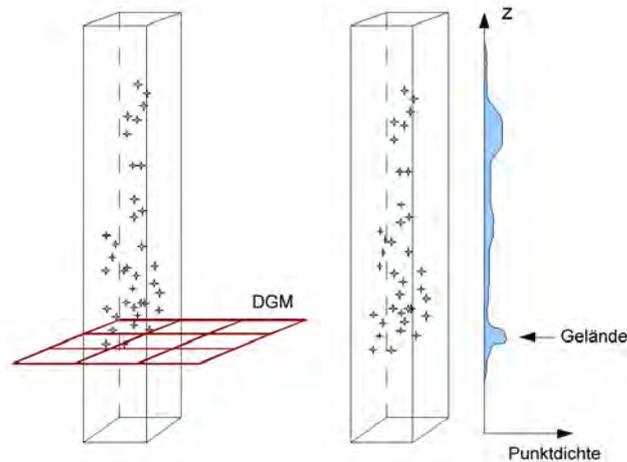


Abbildung 5.2: Ableitung der Geländehöhe an der Stelle der höchsten Punktdichte innerhalb einer 3D-Rasterzelle (Bienert et al., 2006).

5.2.1.2 Geländecharakteristik

Aus dem extrahierten Geländemodell lassen sich zusätzliche Informationen zur Geländecharakteristik ableiten. Unter der Geländeneigung v_N ist der Winkel zu verstehen, der von der ausgleichenden Ebene der Rasterpunkte und der Horizontalebene eingeschlossen wird. Berechnet wird dieser Winkel über die Normalenvektoren \mathbf{n}_1 und \mathbf{n}_2 der beiden Ebenen.

$$v_N = \arccos \frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_1| |\mathbf{n}_2|} \quad (5.1)$$

Die Geländeexposition ist die Angabe der Himmelsrichtung in Richtung des Hauptgefälles. Durch Projektion des Normalenvektors in die Horizontalebene wird der eingeschlossene Winkel mit der Nordrichtung bestimmt. Dies setzt voraus, dass die Ausrichtung des Scanners im Gelände bekannt ist, um einen übergeordneten Bezug zur Himmelsrichtung aufzustellen. Aus der Analyse der Abweichungen der Geländepunkte zu einer horizontalen Ebene werden die lokalen Änderungen bestimmt. Global gesehen repräsentieren diese die Reliefform.

5.2.2 Digitales Kronenmodell

Das DKM wird aus den höchsten Punkten innerhalb der Rasterzellen, der Größe s_R , gebildet. Dabei legt die Höhenkoordinate Z des höchsten Punktes die Höhe des Rasterpunktes fest (Maximumfilter – in Analogie zur Filterung in 5.2.1.1). Diese Methode führt zu einem Lageversatz des eigentlichen Punktes bis maximal einer halben diagonalen Rasterzelle ($\sqrt{2}(s_R/2)$). Da die späteren Analysen mit einer Rasterzellenbreite von 20 cm durchgeführt werden, ist ein Lagefehler von maximal 14 cm mit einem maximalen Quantisierungsrauschen von 5,8 cm in X und Y zu erwarten. Auch in der Höhenbestimmung kommt es zu Abweichungen, die tendenziell zu klein ausfallen, da aufgrund von Verdeckungen im Kronenraum die Baumspitzen nicht vollständig erfasst werden. Da das DKM absolute Höhenwerte repräsentiert, ist dies nur in Verbindung mit dem Verlauf des Waldbodens ein aussagekräftiges Modell für Forstanwendungen. Gebildet aus der Differenz des DGM und des DKM, repräsentiert das normierte digitale Kronenmodell (nDKM) die relativen Höhen der Bäume im Bestand.

5.3 Baumdetektion

Die Detektion von Bäumen in einer 3D-Punktwolke ist eine anspruchsvolle Aufgabe, deren Erfolg die weitere Datenprozessierung beeinflusst. Verschiedene Methoden haben sich etabliert. Die geläufigste Methode basiert auf der Analyse einer extrahierten Horizontalschicht über dem Gelände. Die Stämme erscheinen, je nach Beschaffenheit des Bestandes, als (halb-)kreisförmige Objekte. Andere Objekte, wie bodennahe Vegetation oder künstliche Objekte (Futterkrippe, Hochstand etc.), weisen andere Formen auf. Basierend auf einer Rasterdarstellung der Horizontalschicht, bewirkt eine 2D-Hough-Transformation für Kreise eine Detektion der Stämme (Simonse et al., 2003; Aschoff & Spiecker, 2004; Thies & Spiecker, 2004). Thies & Spiecker (2004) präsentieren mit der Methode der Hough-Transformation eine automatische Baumdetektion mit einer maximalen Detektionsrate von 22 % in Single-Scan-Aufnahmen und 52 % in Multiple-Scan-Aufnahmen. Die daraus abgeleiteten Baumpositionen zeigen hohe Genauigkeiten zu den konventionell ermittelten Baumpositionen. Schilling et al. (2011b) schließen der Hough-Transformation in konstanten Punktwolkenschichten ein RANSAC an, um eine 3D-Linie der Stammachse zu extrahieren.

Aufgrund der räumlichen Verteilung der Stämme bieten Punktwolkenschichten eine ideale Basis für Clusteralgorithmen. Ansätze unterschiedlicher Herangehensweisen finden Anwendung. Der Clustering folgt meist eine ausgleichende Kreisberechnung, um Stammcluster von anderen Punktanhäufungen zu unterscheiden. Király & Brolly (2007) verwenden einen Clusteralgorithmus in Kombination mit einer Kreisgleichung, der iterativ die Punkte einer Schicht gruppiert, sobald der Abstand der Schwerpunkte der bestehenden Cluster geringer ist als ein vorgegebener Wert. Über diese Methode wurden 142 von 169 Bäumen erfolgreich detektiert. Ein zweiter Ansatz beruht auf der Segmentierung von Clustern, basierend auf dem Punkt der geringsten Entfernung zum Scanner. In definierter Nachbarschaft zu diesem Punkt wird ein Kreis eingepasst. Liegt eine erfolgreiche Kreiseinpassung vor, handelt es sich um einen Baum, und der Punkt mit dem geringsten Abstand zum Scanner definiert den Startpunkt für das nächste Cluster. Diese Methode ist im Vergleich zur Ersten erfolversprechender, da nur 3 der 169 Bäume nicht detektiert werden konnten. Jutila et al. (2007) extrahieren aus den Polarwinkeln Punkte, beginnend mit aufsteigendem Horizontalwinkel, die verschiedene Kriterien, u. a. zum Abstand, zum Winkel und zur Krümmung, erfüllen müssen.

Anhand von Eigenwerten und der korrespondierenden Eigenvektoren ist eine Segmentierung und Klassifizierung der Punktwolke in Stamm-, Ast- und Blätterpunkte möglich (Lalonde et al., 2006; Bae & Lichti, 2004b). Dazu wird die Punktwolke in definierte Punktbereiche eingeteilt, die z. B. mit Hilfe von Voxeln extrahiert werden.

Die Grundvoraussetzung für eine automatische Ableitung der Baumparameter ist die Detektion der Bäume innerhalb der Punktwolken. Diese wiederum setzt ein erfolgreich generiertes DGM voraus. Nach erfolgreicher Detektion werden die Anzahl der im Datensatz befindlichen Bäume, die genäherten Baumpositionen sowie die extrahierten Einzelbaumpunktwolken für die anschließenden Prozessierungsschritte zur Verfügung gestellt. Die Baumdetektion stellt den wichtigsten Prozess in der Verarbeitungskette dar, da erst durch erfolgreich segmentierte Bäume eine baumweise Bestimmung der forstinventurrelevanten Parameter erfolgen kann.

Der Prozess der Baumdetektion ist grundsätzlich mit einer Segmentierung der Daten verbunden. Manchen Methoden wird zusätzlich noch eine Klassifizierung angeschlossen, um eine automatische Zuordnung zur Klasse 'Baum' und 'nicht Baum' zu gewährleisten. Bei dem Prozess der Segmentierung wird der Merkmalsraum durch Anwendung mathematischer und morphologischer Operatoren in inhaltlich zusammenhängende Regionen (Segmente) gleicher Kriterien (z. B. Cluster, bestimmte Merkmale, Intensitäten) unterteilt. Die Segmentierungsverfahren untergliedern sich nach Jähne (2002) in pixelbasierte, regionenorientierte, kantenbasierte und modellbasierte Methoden. Je nach Fragestellung findet eine Segmentierung der terrestrischen Laserscannerdaten statt:

- im 2D-Raum (Intensitätsbild, Punktwolkenschnitte),
- im 2,5D-Raum (Entfernungsbild) oder
- im 3D-Raum (Punktwolke, Voxelraum).

Bis auf die Baumdetektion im Intensitätsbild wurden im Rahmen der Arbeit Algorithmen entwickelt und in generischen C++-Routinen umgesetzt, die es ermöglichen, aus Single- und Multiple-Scan-Aufnahmen Bäume zu detektieren. Die Detektionsraten der im Folgenden vorgestellten Algorithmen werden im Kapitel 7 präsentiert.

5.3.1 Segmentierung im Intensitätsbild

Das Intensitätsbild ist ein Graustufenbild, bei dem jedes Pixel einen Laserscannerpunkt repräsentiert. Der Grauwert spiegelt die Intensität wieder, mit der der Laserscannerpunkt reflektiert wurde. Die einfachste Methode, in einem Graustufenbild eine Segmentierung durchzuführen, ist das Schwellwertverfahren (pixelbasierte Segmentierung). So wird aus einem Graustufenbild ein Binärbild erzeugt und es werden Pixel mit einem Grauwert größer als der Schwellwert als Objektpixel und anderenfalls als Hintergrundpixel definiert. Durch Anwendung weiterer Bildverarbeitungsmethoden, wie Algorithmen zur Kantenextraktion, werden Kanten, die durch Bereiche großer Grauwertsprünge repräsentiert werden, detektiert. Pál (2008) stellt eine Methode vor, die auf der Grundlage von Intensitätsbildern Baumstämme extrahiert. Das über Schwellwertverfahren binarisierte Intensitätsbild mit einem Großteil an Stämmen, die als Vordergrundpixel erhalten geblieben sind, wird einer Skelettierung unterzogen. Die Übergänge der Stämme zum Hintergrund werden als Linien extrahiert, aus denen dann die Stammmittellinien bestimmt werden. Ein Verfahren zur Segmentierung von Intensitätsbildern mit dem Ziel der Detektion und Extraktion von weißen Kugeln für Registrierungszwecke wird in Abschnitt 6.1.1.2 vorgestellt.

5.3.2 Segmentierung in Punktwolkschichten

Bei der Segmentierung innerhalb einer Punktwolkschicht wurden zwei Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz ist die Segmentierung im 2D-Objektraum auf Basis von 2D-Koordinaten einer in eine horizontale Ebene projizierten Punktwolkschicht. Die eigentliche Segmentierung wird durch eine Clusterung durchgeführt, deren Cluster dann in einer Klassifizierung über eine ausgleichende Kreisberechnung zur Klasse 'Baum' oder 'nicht Baum' zugeteilt werden.

Eine 2D-Hough-Transformation für Kreise stellt den zweiten Ansatz dar. Auf Grundlage der projizierten Punktwolkschicht wird ein Bild erzeugt, das in den weiteren Bearbeitungsschritten verwendet wird. Während die projizierte Punktwolkschicht eine willkürliche Punktanordnung aufweist, liegt bei dem Bild ein Raster mit konstantem Abstand vor.

5.3.2.1 Clustermethode

5.3.2.1.1 Grobsegmentierung

Die Baumstämme werden in horizontalen Punktwolkschichten als (halb-)kreisförmige Punktformation dargestellt. In einem ersten Schritt müssen zunächst Punktcluster gefunden werden, die dann einer Klassifizierung unterzogen werden, um die kreisförmigen Punktanordnungen zu detektieren. Als Basis für die Punktwolkschicht dient das extrahierte DGM. Eine ausgleichende Ebene durch die DGM-Punkte legt die Lage der Schnittebene fest. In 1,3 m Abstand über dieser Ebene wird die Punktwolkschicht mit einer konstanten Höhe herausgefiltert.

Separierung

Zur Detektion der Bäume in horizontalen Punktwolkschichten wird ein modifizierter Separierungsalgorithmus angewendet, der in Scheller (2005) zur Rekonstruktion des Tragwerkes eines Kirchendachstuhls entwickelt wurde. Der Algorithmus separiert Punkte auf Grundlage eines quadratischen Strukturelementes. Das Strukturelement, mit einer quadratischen Größe s , sucht und separiert die Laserscannerpunkte eines Clusters. Dabei ist das Strukturelement in vier Quadranten aufgeteilt. An den Eckpunkten des Strukturelementes befinden sich primäre Suchpositionen, während die Schnittpunkte der Quadrantenbegrenzungen mit dem Strukturelement die sekundären Suchpositionen definieren (Abbildung 5.3). Ausgehend von einem Laserscannerpunkt der Schicht schiebt sich das Strukturelement über die Schicht und positioniert sich mit dem Mittelpunkt auf den primären Suchpositionen, gefolgt von den sekundären Positionen. Sobald Punkte in einem Quadranten enthalten sind, werden die Suchpositionen des Quadranten angefahren. Sind alle Quadranten mit Punkten belegt, so sind die nächsten acht Suchpositionen durch das Strukturelement vorgegeben. Die Punkte werden getrennt, sobald die Distanz zum nächsten Punkt auf der primären Suchposition größer ist als $\sqrt{2} \frac{s}{2}$. Bei den sekundären Suchpositionen findet eine Trennung schon ab einer Entfernung von $s/2$ statt.

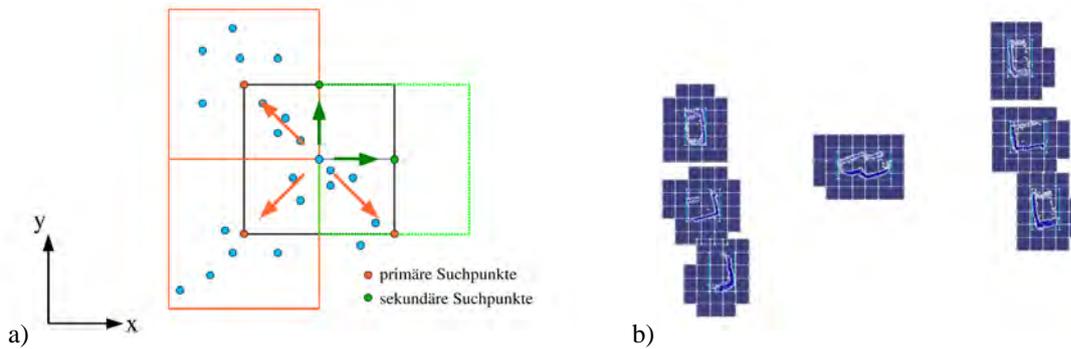


Abbildung 5.3: a) Strukturelement mit Suchpositionen; b) Separierte Objekte am Beispiel eines Tragwerkschnittes (Scheller & Schneider, 2006).

Klassifizierung

Die separierten Punktcluster werden in einer Liste mit deren minimaler und maximaler Begrenzung in Richtung der Koordinatenachsen (Begrenzungsbox) sowie den Koordinatenschwerpunkten der Cluster verwaltet. In einem zweiten Schritt werden die Punktcluster, deren Anzahl größer als eine vorgegebene Mindestpunktzahl n_{min} ist, einer Kreisausgleichung unterzogen. Kleinere Punkthäufungen, verursacht durch Äste oder Bodenvegetation mit einer Punktzahl kleiner n_{min} , werden somit von vornherein ausgeschlossen. Anhand der Standardabweichung $\hat{\sigma}_0$ und des berechneten Durchmessers werden die Objekte klassifiziert und Bäume detektiert. Objekte mit einem berechneten Durchmesser oberhalb der Derbholtzgrenze⁸ und einer Standardabweichung kleiner als ein vorgegebener Grenzwert werden als Bäume detektiert. Anderenfalls werden die Punktcluster in einer Liste der zurückgewiesenen Objekte abgelegt. Der Mittelpunkt des eingepassten Kreises gibt die Näherungsposition des Baumes an.

Zugehörigkeitsanalyse

Eine Detektion in mehreren der Höhe nach verteilten Schichten führt zu zuverlässigeren Ergebnissen in der Baumdetektion. Über eine räumliche Zugehörigkeitsabfrage der als Baum klassifizierte Objekte werden Fehldetektionen minimiert, denn ein vertikaler Stammverlauf ist in annähernd denselben Positionen der unterschiedlichen Schichten wiederzufinden. Grundlage ist die erste Schicht in 1,3 m über dem Gelände. In konstantem Abstand werden ober- und unterhalb der Schicht zwei neue Schichten extrahiert und diese ebenfalls separiert und klassifiziert (Abbildung 5.4). Im Fall gerade gewachsener Bäume liegen die zusammengehörenden Baumpositionen in der Horizontalprojektion sehr dicht beieinander. Aus den übereinanderliegenden Baumpositionen wird dennoch eine 3D-Gerade gebildet und die Lage der Baumposition zur Raumgeraden hin analysiert (um schräg stehende Bäume zu berücksichtigen). Es ist davon auszugehen, dass in der ersten Schicht wenige Äste vorhanden sind, dafür allerdings mehr Bodenvegetation als in den darauffolgenden Schichten. Sind der untersten Schicht keine Baumobjekte aus den beiden folgenden Schichten zuzuordnen, wird das ursprünglich als Baum klassifizierte Objekt in die Liste der zurückgewiesenen Objekte zurückgestellt. Finden sich im entgegengesetzten Fall zwei Übereinstimmungen aus den angrenzenden Schichten, aber nicht in der ersten Schicht, wird der Schnittpunkt der Raumgeraden mit der untersten Schnittebene als erfolgreich detektierter Baum zur klassifizierten Objektliste hinzugefügt.

Trotz Zugehörigkeitsabfrage sind in den Objektlisten noch fehlerhaft detektierte Bäume enthalten. Um diese zu erkennen und gar ausgeschlossene Bäume dennoch zu detektieren, wird im Anschluss an die Grobsegmentierung noch eine Feinsegmentierung durchgeführt.

⁸ Stämme mit mehr als 7 cm Durchmesser



Abbildung 5.4: Grobsegmentierung in drei horizontalen Schichten; grün: als Baum klassifizierte Objekte; rot: zurückgewiesene Objekte (Bienert & Scheller, 2008).

5.3.2.1.2 Feinsegmentierung

Scanning-Technologien bilden die aufgenommene Objektfläche durch ein regelmäßiges Punktraster ab. Die Punktzahl innerhalb eines definierten Bereiches hängt dabei von der Scanauflösung, der Entfernung und der Ausrichtung des Objektes zum Scanner ab. Eine horizontale Schicht definierter Dicke bildet in der 2D-Projektion die vertikal verlaufenden Stämme mit einer sehr hohen Punktdichte ab. Andere Vegetationselemente und Objekte sind durch eine geringere Punktdichte gekennzeichnet. Diese Eigenschaft wird bei der Feinsegmentierung genutzt.

Die Feinsegmentierung wird durchgeführt, um Fehldetektionen zu minimieren. Dabei werden die Objektlisten, die neben den Bäumen noch andere Objekte enthalten (Fehler 2. Art), sowie die zurückgewiesenen Listen, die ebenfalls Bäume enthalten können (Fehler 1. Art), aus der Vorsegmentierung erneut prozessiert. Die Objekte werden mit einem konstanten Abstand gerastert (Abbildung 5.5 a und b). Jede Rasterzelle erhält als Attribut die in ihr befindliche Anzahl an Laserscannerpunkten. Je nach vorhandenem Vegetationselement variiert die Punktzahl. Die Stammoberflächen zeichnen sich durch eine große Punktzahl aus (Abbildung 5.5 c). Die mögliche Maximalanzahl an Zielpunkten innerhalb eines Rasters wird aus der Entfernung des Rasters, der Scanauflösung, der Dicke der projizierten Schicht und der Objektausrichtung bestimmt. Dabei wird von einer diagonal durch das Raster verlaufenden Stammoberfläche ausgegangen, um das mögliche Maximum an Punkten zu bestimmen. Ein prozentualer Anteil dieses Wertes wird als Schwellwert für alle Rasterzellen verwendet, um eine Filterung nach der Punktdichte vorzunehmen. Die Laserscannerpunkte einer Rasterzelle mit einer Anzahl größer als der Schwellwert bleiben erhalten und werden einer erneuten Kreisausgleichung unterzogen. Mit dieser Methode werden über Kreiseinpassungen Bereiche geringer Dichte von der eigentlichen Klassifizierung ausgeschlossen, und das führt zu erfolgreicherer Detektionen (Abbildung 5.5 e).

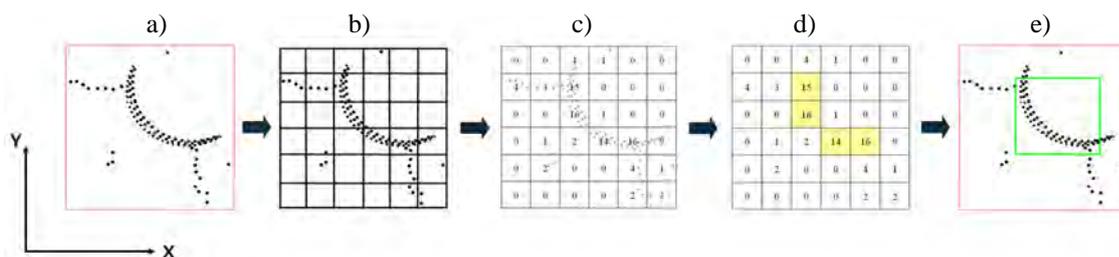


Abbildung 5.5: Schematischer Ablauf der Feinsegmentierung (Bienert & Scheller, 2008).

Fehldetektionen in Form von Sträuchern oder Ästen werden über die Punktdichteanalyse detektiert und aus der Objektliste eliminiert. Die Anwendung dieser Filterung auf die zurückgewiesenen Objekte ermöglicht das Erkennen falsch zurückgewiesener Bäume, z. B. aufgrund dichter Aststrukturen. Über diese Methode können Bestände mit dichten Ästen im unteren Stammbereich dennoch detektiert werden.

5.3.2.1.3 Abschattung

Ein Effekt beim terrestrischen Laserscanning sind Verdeckungen bzw. abgeschattete Bereiche. Objekte, die während der Datenaufzeichnung vor dem Scanner standen, erzeugen Abschattungen (sichttote Bereiche). Je näher ein Baum vor dem Scanner steht, umso größer ist der sichttote Bereich hinter dem Baum. Dies führt zu teilweise oder gar komplett verdeckten Bäumen. Im Forst können die Scanschatten durch die Wahl einer geschickten Aufnahmeconfiguration minimiert, aber selten umgangen werden. Die Fläche $A_{Schatten}$ der Abschattung (Abbildung 5.6), bezogen auf eine horizontale Ebene, wächst quadratisch mit der Breite des Schatten werfenden Objektes. Zur Berechnung des Scanschattens $A_{Schatten}$ bezogen auf eine horizontale Fläche, wird von dem Kreisabschnitt mit dem Flächeninhalt A_{gesamt} bis zur Plotgrenze r_{Plot} die horizontale Fläche A_I sowie die restliche Grundfläche des Stammes A_{II} abgezogen (Gleichung 5.2 – 5.5).

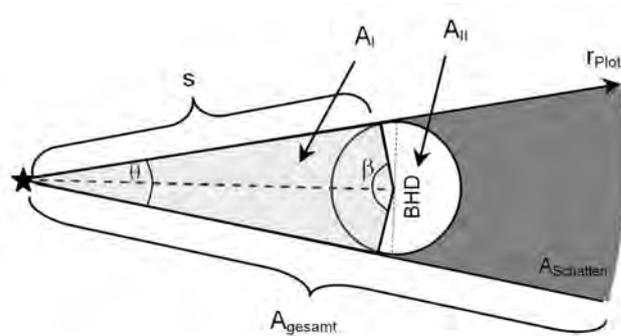


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der abgeschatteten Fläche $A_{Schatten}$ durch einen Baumstamm.

$$A_{Schatten} = A_{gesamt} - A_I - A_{II} \quad (5.2)$$

$$A_{gesamt} = \frac{\pi \theta}{360^\circ} r_{Plot}^2 \quad \text{mit} \quad \theta = 2 \arctan\left(\frac{BHD/2}{s}\right) \quad (5.3)$$

$$A_I = \frac{BHD}{2} s \quad (5.4)$$

$$A_{II} = \frac{\pi(360 - \beta)}{360^\circ} (BHD/2)^2 \quad \text{mit} \quad \theta = 2(90^\circ - \alpha/2) \quad (5.5)$$

Für eine einzelne Aufnahme im Forst bedeutet dies allerdings, dass mit zunehmender Plotgröße der Bereich der verdeckten Fläche zunimmt und somit auch die Wahrscheinlichkeit der teilweise bis komplett abgeschatteten Bäume. Dringt der Laserimpuls ungehindert bis zum Stamm durch, ist bei genügend großer Punktzahl die Detektion des Stammes über die Plotgrenze hinaus teilweise noch möglich. Die Reichweite des Distanzmessers wird limitiert durch das eingesetzte Messverfahren und die Dichte des Bestandes.

5.3.2.1.4 Reichweite

Mit der Gleichung 5.6 lässt sich die Mindestanzahl n_{min} an Punkten innerhalb eines Clusters annähernd bestimmen, die notwendig ist, um das Cluster nicht von vornherein bei der Klassifizierung der Grobsegmentierung zu verwerfen (Abbildung 5.7). Eine Näherung für n_{min} ergibt sich aus dem Quotienten der Mantelfläche A_M und der Punktdichte R_{Punkt} . Die einseitige Mantelfläche A_M eines Stammes, die bei uneingeschränkter Visur von einem Standpunkt aus sichtbar ist,

wird aus der Schichthöhe sh , dem geschätzten mittleren BHD BHD_m und dem maximal sichtbaren Stammsegment μ_{max} am Stamm bestimmt (Abschnitt 2.2.1.1). Da sich das maximal sichtbare Stammsegment aus der Entfernung und dem Stammdurchmesser ergibt, wird als Entfernung der Plotradius r_{Plot} verwendet.

$$n_{min} \sim \frac{A_M}{R_{Punkt}} \quad (5.6)$$

$$A_M = \frac{\pi BHD_m \mu_{max}}{360^\circ} sh \quad (5.7)$$

Mit der Scanauflösung α_{Scan} wird die Punktdichte R_{Punkt} am Stamm an der Stelle r_{Plot} berechnet.

$$R_{Punkt} = (r_{Plot} \tan \alpha_{Scan})^2 \quad (5.8)$$

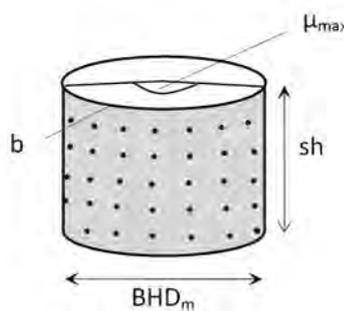


Abbildung 5.7: Sichtbare Mantelfläche des Stammes mit Laserscannerpunkten bei einer Schichthöhe sh und einem Durchmesser BHD_m .

Die Detektion der Stämme in größeren Plotflächen wird eingeschränkt durch die DGM-Generierung und die Schichthöhe. Mit wachsender Entfernung zum Laserscanner nimmt die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Geländemodellierung aus den TLS-Daten aufgrund der Bodenvegetation und des flachen Einfallswinkels und der daraus resultierenden geringen Abdeckung ab. Zur Berechnung der Schichthöhe empfiehlt es sich, als Grundlage die DGM-Punkte um den Laserscanner zu verwenden, was bei ebenem Gelände unproblematisch ist. Die Variation der Schichthöhe ist abhängig von der Geradlinigkeit der Stammachsen, da die Punkte einer Schicht auf eine horizontale Ebene projiziert werden. Bei schräg stehenden Bäumen wird in der Projektion ein künstliches Rauschen verursacht, was letztendlich zu einer Zurückweisung (Fehler 1. Art) der Cluster führen kann. Ein Lösungsansatz ist das Einpassen eines Zylinders in die 3D-Punkte.

5.3.2.1.5 Fehldetektionen

Aufgrund von Verdeckungen, verursacht durch dichte Bodenvegetation und niedrig ansetzende Äste am Stamm, kommt es bei der Detektion in Punktwolkschichten zu Fehlern (Abbildung 5.8). Diese Fehldetektionen werden in zwei Gruppen eingeteilt. Fehler 1. Art sind Bäume, die nicht als Bäume detektiert werden, da beispielsweise abgehende Äste das Ergebnis der Kreisausgleichung verfälschen und zu einer Zurückweisung führen, oder solche, die aufgrund von Abschattungen gar nicht erst im Datensatz vorhanden sind. Aufgrund der Nichtdetektion werden die Bäume im weiteren Verarbeitungsprozess nicht weiter berücksichtigt. Fehler 2. Art sind im Gegensatz zu denen 1. Art nicht ganz so schwerwiegend. Diese treten dann auf, wenn falsche Objekte (z. B. Äste, Sträucher) als Bäume detektiert werden, weil deren Punktanordnung ein plausibles Ergebnis in der Standardabweichung der Kreisausgleichung liefert. Da diese fehlerhaften Objekte im Datensatz erhalten bleiben, wird deren Plausibilität meist bei weiteren Bearbeitungsroutinen geprüft und dort oft als fehlerhaft festgestellt. Durch verschiedene Bearbeitungsroutinen (z. B.: Feinsegmentierung, Segmentierung in mehreren Schichten) wird versucht, das Auftreten der Fehler möglichst gering zu halten.

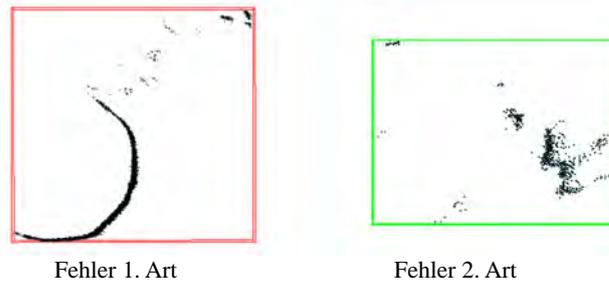


Abbildung 5.8: Fehldetektionen; Fehler 1. Art: Nicht detektierter Baum aufgrund von vorhandenen Astpunkten; Fehler 2. Art: Bodenvegetationspunkte mit einem plausiblen $\hat{\sigma}_0$ der Kreisausgleichung.

Im Venn-Diagramm (Abbildung 5.9) sind die Fehler 1. Art und 2. Art grafisch dargestellt. Die *Grundgesamtheit* GG (gelbe Menge) repräsentiert alle Laserscannerpunkte innerhalb einer Schicht. Aufgrund von Verdeckungen gibt es einige *Bäume* B (graue Menge), die nicht abgebildet und somit nicht zu GG gehören. Der Hauptbestandteil von GG wird durch die Mengen der aufgestellten Klassen der *Nicht-Baum-Objekte* O_{NB} (rote Menge) und der *Baum-Objekte* O_B (grüne Menge) gebildet. Punkte, die aufgrund einer zu kleinen Punktzahl vor der Klassifizierung zurückgewiesen wurden, stellen die Restmenge von GG dar. Dies können neben Bodenvegetations- auch Baumpunkte sein. Die Menge an *Baum-Objekten* O_B die nicht in den *Bäumen* B enthalten ist, symbolisiert die Fehler 2. Art. Die Schnittmenge der *Bäume* B mit den klassifizierten *Nicht-Baum-Objekten* O_{NB} bilden die Fehler 1. Art.

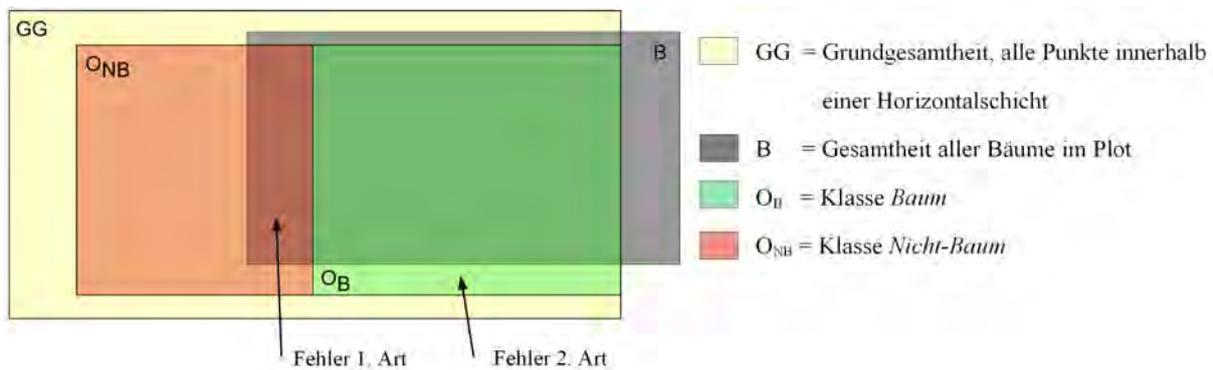


Abbildung 5.9: Venn-Diagramm zur Darstellung der Fehldetektionen anhand der Mengen B, O_{NB} , O_B und GG.

5.3.2.2 2D-Hough-Transformation

Eine weitere Methode, Bäume in horizontalen Punktwolken-schichten zu detektieren, ist die 2D-Hough-Transformation, die 1962 von P.V.C. Hough patentiert wurde. Mittels Hough-Transformation, die ein modellbasiertes Segmentierungsverfahren darstellt, können Geraden (Scheller & Schneider, 2006), Kreise, Ellipsen und sogar Körper wie z. B. Zylinder (Rabbani & van den Heuvel, 2005) bestimmt werden. Thies et al. (2004) und Simonse et al. (2003) wenden diese Methode zur Bestimmung des Stammdurchmessers an. Aus der XY-Projektion einer horizontalen Punktwolken-schicht wird ein Bild erzeugt. Die Auflösung des Bildes trägt maßgeblich zur Genauigkeit des Stammdurchmessers bei. Die Referenzstruktur (Kreis oder Ellipse) wird durch eine Parameterdarstellung eindeutig festgelegt. Während der Kreis durch drei Parameter, Mittelpunkt (X_M , Y_M) und Radius r , eindeutig beschrieben wird, wird die Ellipse durch fünf Parameter (X_M , Y_M , zwei Halbachsen und ein Winkel), festgelegt. Die Parameteranzahl definiert die Dimension des Akkumulators. Dies ist im Fall des Kreises ein dreidimensionales Array, was zu Beginn mit Nullen initialisiert wird. Nun definiert jeder Punkt im Bild den Mittelpunkt eines Kreises mit variierendem Radius (von r_{min} bis r_{max}). Die Positionen der Kreispunkte (X , Y , r) werden im Akkumulator inkrementiert. Maxima im Akkumulator, Bereiche, in denen sich die meisten Kreise schneiden, stehen für die detektierte Referenzstruktur (Abbildung 5.10).

Letztendlich werden die Parameter des Akkumulators in den Bildraum überführt und die Bestimmung des Kreises ist abgeschlossen. Sind die Stammdurchmesser bekannt, bspw. in angepflanzten Plantagen, kann der Transformationsraum von einem 3D-Array auf ein 2D-Array reduziert werden, was eine Rechenzeitreduktion bewirkt. Letztendlich ist dieses Verfahren robust gegenüber Unterbrechungen im Stammverlauf (Scanschatten). Die Hough-Transformation kann auch auf die Laserscannerpunkte direkt angewendet werden, was die Überführung in den Bildraum erspart. Eine ausführlichere Abhandlung der 2D-Hough-Transformation ist z. B. in Nischwitz et al. (2007) gegeben.

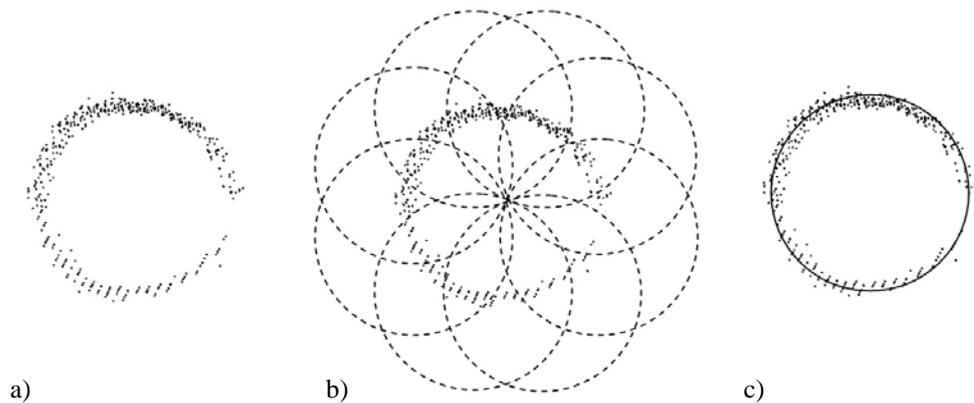


Abbildung 5.10: Prinzip der Hough-Transformation für Kreise: a) Schicht einer Stammpunktwolke; b) überlagerte Punktwolke mit Kreisen von konstantem Radius (zur vereinfachten Darstellung); c) Stammpunkte mit detektiertem Houghkreis.

Auf Basis einer horizontalen Punktwolkschicht wird in einem ersten Schritt ein Binärbild erzeugt. Die Auflösung des Bildes ist an die Scanauflösung und die Ausdehnung der Schicht gekoppelt. Auf das Bild wird in einem zweiten Schritt eine 2D-Hough-Transformation angewendet mit dem Ziel, aus den (halb-)kreisförmigen Stammquerschnitten im Bild die Stammmitte automatisch zu detektieren und deren Durchmesser zu bestimmen. Dazu wird die Funktion der Hough-Transformation für Kreise aus der Open-CV-Bibliothek verwendet und in ein C++-Projekt eingebunden. Um falsch detektierte Kreise von vornherein auszuschließen, werden die Pixel innerhalb eines Kreises mit halbem Radius untersucht. Sobald mehr als eine bestimmte Anzahl n gefüllter Pixel (schwarze Pixel) gezählt werden, gilt der Kreis als Fehldetektion (Abbildung 5.11).

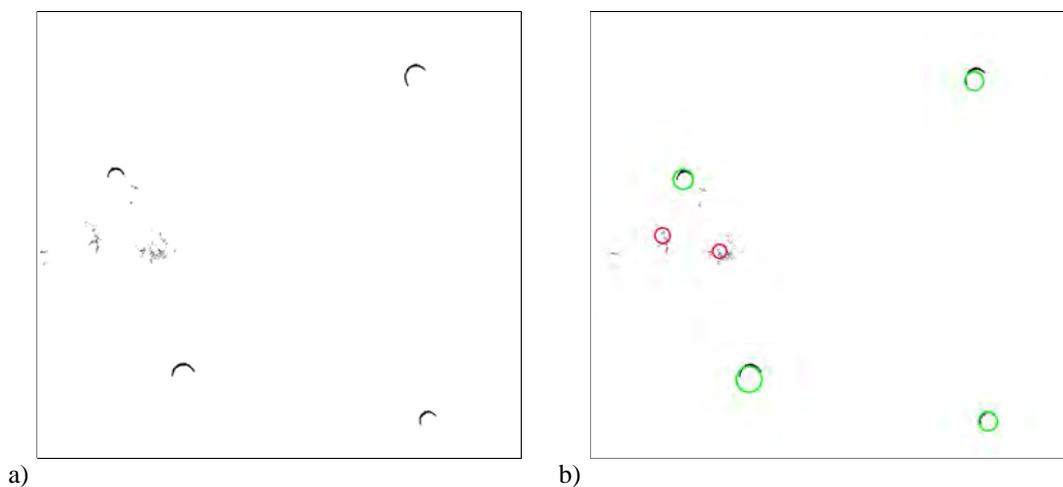


Abbildung 5.11: a) Vorverarbeitetes Binärbild einer horizontalen Punktwolkschicht mit vier Stammquerschnitten; b) Binärbild mit eingeblendeten Houghkreisen (grün = detektierte Stämme, rot = Fehldetektion).

5.3.2.3 Baumseparierung

Nach erfolgreicher Baumdetektion liegen für jeden Baum Näherungskoodinaten der Baumposition vor, die mit dem Verfahren der ausgleichenden Kreisberechnung ermittelt wurden (Abschnitt 5.4.3.1). Zur Ableitung weiterer geometrischer Baumparameter ist die Kenntnis der Zugehörigkeit der Laserscannerpunkte eines Baumes notwendig. Eine Reduktion der Punktwolke auf die zu untersuchenden Baumpunkte hat Einfluss auf die Prozessierungszeit.

Die einfachste Methode ist die Separierung der Baumpunkte durch einen vertikal stehenden Zylinder mit Radius r an der Näherungsposition (Abbildung 5.12). Alle Punkte mit einer horizontalen Distanz zur Näherungsposition kleiner r gehören zu einem Baumobjekt.

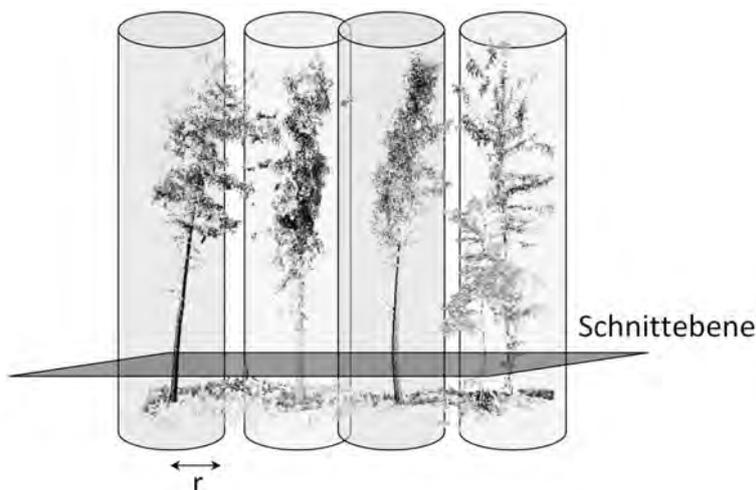


Abbildung 5.12: Separierung der Baumpunkte mit vertikalen Zylindern, positioniert an den Näherungspositionen in Höhe der Schnittebene zur Baumdetektion.

Diese Methode hat den Nachteil, dass alle Bäume mit dem gleichen Radius separiert werden. Dies hat zur Folge, dass schräg stehende Bäume und Bäume mit breiten Baumkronen nicht vollständig erfasst werden und im entgegengesetzten Fall Äste von benachbarten Bäumen in den Zylinder ragen. Deshalb ist der Zylinderradius in Abhängigkeit von der Bestandsdichte, der Baumart sowie der abzuleitenden Baumparameter zu wählen. Steht die Bestimmung der Biomasse des Stammholzes im Vordergrund, reicht ein Zylinder mit kleinem Radius aus. In anwendungsspezifischen Fällen, z. B. bei der Bestimmung von Kronenparametern, ist eine Separierung durch die in Abschnitt 5.3.4 beschriebene Baumdetektion über Voxel notwendig und einer aufwendigen manuellen Baumseparierung (Hopkinson et al., 2004) vorzuziehen.

5.3.3 Segmentierung im Entfernungsbild

Die Segmentierung im Entfernungsbild basiert auf einer Single-Scan-Aufnahme und wird über eine regionenorientierte Vorgehensweise erreicht. Böhm (2005) unterscheidet in eine kanten- und eine regionenorientierte Methode zur Segmentierung von Entfernungsbildern. Im Rahmen dieser Dissertation wird zunächst eine regionenorientierte Segmentierung vorgenommen, die dann mit einer kantenorientierten Methode erweitert wird, um die einzelnen Stammsegmente voneinander abzugrenzen.

Über die Scanauflösung und die maximale horizontale und vertikale Ausdehnung der Scanaufnahme werden nach Abschnitt 2.4.2 zwei Entfernungsbilder erzeugt. Die als Grauwert abgespeicherte Entfernungsinformation eines jeden Pixels erfolgt als 2D- und zusätzlich als 3D-Entfernung. Beide Varianten zeigen in der späteren Ergebnisauswertung Unterschiede. Da der Boden zu jedem Baum eine Verbindung darstellt, muss dieser vor der Erstellung des Entfernungsbildes entfernt werden. Dies kann zum einen interaktiv geschehen oder, wie in Abschnitt 5.3.4 vorgestellt, automatisch erfolgen.

Im zweiten Schritt wird auf Grundlage der erstellten Entfernungsbilder pro Bild eine Konnektivitätsanalyse angeschlossen (Abbildung 5.13). In einer zuvor definierten Nachbarschaft (Strukturelement) werden die Pixel als zusammenhängende Pixel definiert, wenn die Differenz des Zentralpixels und des Nachbarschaftspixels kleiner als ein vorgegebener Grenzwert g_{max} ist. Die Größe der Nachbarschaft sowie des Grenzwertes g_{max} ist abhängig von der Scanauflösung und dem dargestellten Entfernungsbereich. Bäume, die einen größeren Abstand zum Scanner haben, weisen aufgrund des größeren Punktabstandes im Vergleich zu den weniger entfernten Bäumen größere Grauwertsprünge auf. Pixel, deren Pixeldifferenzen innerhalb des Grenzwertes liegen, erhalten das gleiche Label wie das Zentralpixel. Das Strukturelement durchläuft das Bild und fährt alle gleich eingefärbten Pixel an, bis keine weiteren Pixel zu dem Segment hinzugefügt werden können. Dann wird das nächste freie Pixel angefahren, ein neues Label für das neue Segment bestimmt und der zweite Schritt wiederholt sich so lange, bis alle Pixel mit einem Label belegt sind. Das Ergebnis ist ein segmentiertes Entfernungsbild mit Einzelbaumsegmenten (Abbildung 5.14 b). Äste, die Verdeckungen an einem Stamm oder im Kronenraum verursachen und somit den Prozess der Konnektivitätsanalyse behindern würden, werden durch ein genügend großes Strukturelement umgangen.

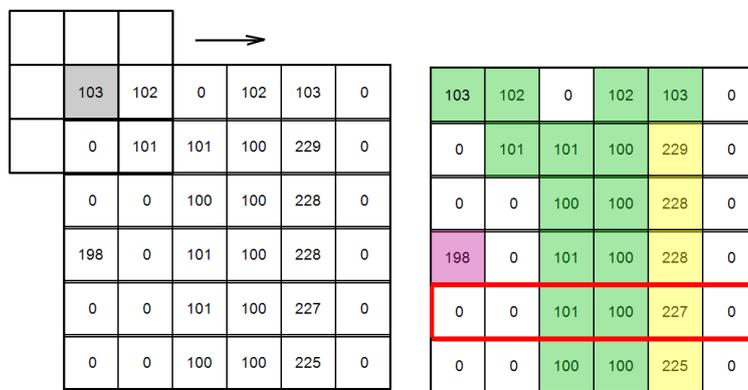


Abbildung 5.13: Prinzip der Konnektivitätsanalyse im Entfernungsbild mit Grauwerten (Strukturelement mit 8er Nachbarschaft und Grenzwert $g_{max} < 3$) mit horizontaler Bildzeilenschicht.

In Anlehnung an die Baumdetektion in einer Punktwolkschicht wird im Anschluss daran aus einer horizontalen Bildzeile ($\Delta y = \text{konst.}$) des unteren Bildbereiches die Baumanzahl und die Näherungsposition gewonnen. Die Bildzeile wird in einer Richtung durchlaufen und die Anzahl überstrichener Segmente gezählt (Abbildung 5.14 c). Diese geben die Baumanzahl vor. Allerdings sollten auch hier, um Verdeckungen zu umgehen, mehrere Bildzeilen in unterschiedlichen Abständen durchsucht werden. Zur Bestimmung der Näherungsposition werden die jeweils zwei detektierten Randpixel eines Segmentes in den 3D-Raum zurücktransformiert und gemittelt. Hier gilt als zusätzliche Restriktion, dass ein Objekt im Vordergrund eine bestimmte Breite überschreiten muss, um als Baum erkannt zu werden. Als Randpixel gelten die Pixel, die einen horizontalen Nachbarn mit einer anderen Farbe, also einer anderen Region, haben (schwarz = Hintergrund, farbig = verdecktes Baumpaar). Unterstützend wird eine Kantendetektion mit einem Canny-Algorithmus durchgeführt, um den Suchbereich in y -Richtung einzuzugrenzen. Stammabschnitte mit tief ansetzenden Ästen eignen sich hierfür weniger, da sie die Baumanzahl sowie die Baumposition verfälschen.

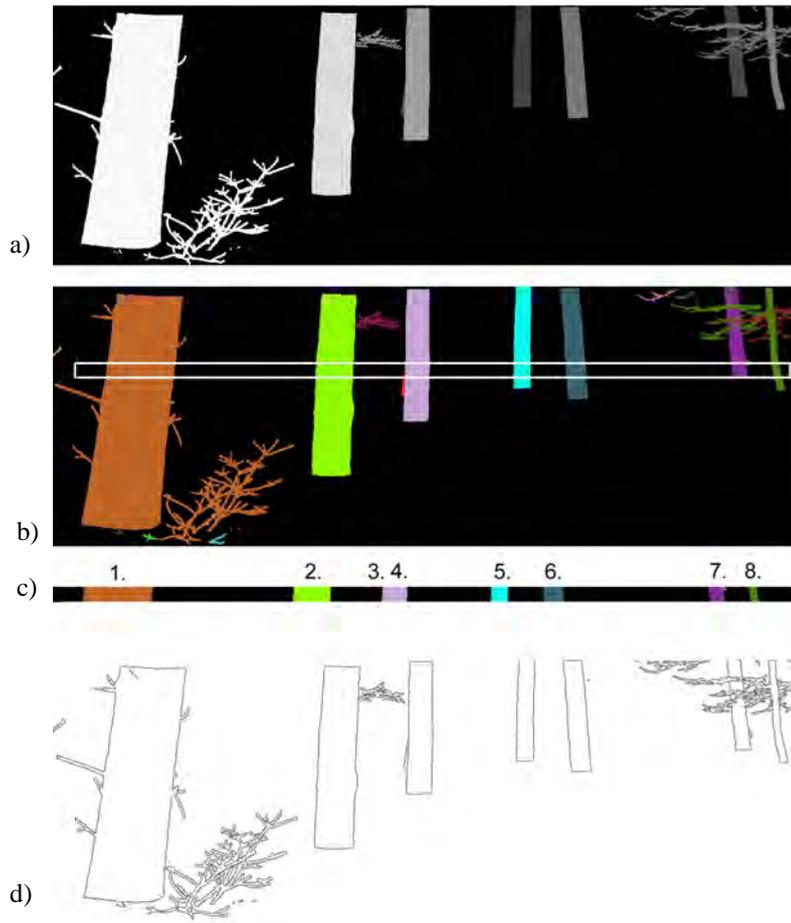


Abbildung 5.14: Ausschnitt einer Single-Scan-Aufnahme ohne Boden. a) 8-Bit-Entfernungsbild; b) segmentiertes Bild mit eingezeichnetem Bildausschnitt; c) horizontaler Bildausschnitt mit Anzahl der Segmente; d) Kantendetektion des segmentierten Bildes mit einem Canny-Algorithmus.

5.3.4 Segmentierung im Voxelraum

Ein Voxelraum ist eine gleichabständige 3D-Gitterstruktur, in die die Punktwolke transformiert wird. Im einfachsten Fall werden die Voxel abgespeichert, die mindestens einen Laserscannerpunkt enthalten. So lässt sich die Punktwolke durch reguläre Gitterstrukturen darstellen. Der gefüllte Voxelraum verfügt über Voxel, die über Indizes (i,j,k) im Raum ansprechbar sind. Dies ermöglicht einfache Nachbarschaftsanalysen, wie z. B. Konnektivitätsanalysen und morphologische Operationen (Gorte & Pfeifer, 2004; Pfeifer et al., 2004). Abbildung 5.15 zeigt verschiedene Konstellationen der unmittelbaren Nachbarschaft eines Voxels (erster Ordnung). Ebenfalls denkbar sind Nachbarschaftskonstellationen zweiter Ordnung und höher.

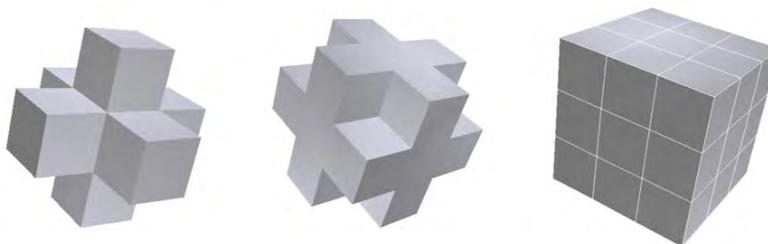


Abbildung 5.15: Voxelnachbarschaften (v.l.n.r.; 6er, 18er, 26er) (Schmidt, 2010).

Der folgende Algorithmus generiert auf Grundlage eines Voxelaumes ein Bodensegment und bestenfalls mehrere Einzelbaumsegmente. Als Eingangsdaten wird die Wald-Punktwolke benötigt, aus dieser wird über Filtertechniken ein DGM generiert und ein Voxelraum aufgestellt. Durch Transformation der DGM-Punkte in den Voxelraum wird das Bodensegment gebildet. Jedes Voxel, das mindestens einen DGM-Rasterpunkt enthält, gehört zu dem Segment 'Boden'. Da die Rasterweite nicht zwangsläufig der Voxelgröße entsprechen muss, werden leere Voxel, die zwischen den gefüllten Bodenvoxeln liegen, berücksichtigt, indem die angrenzenden gefüllten Nachbarvoxel über eine Konnektivitätsanalyse ebenfalls zu dem Segment 'Boden' gezählt werden. Die Bewegung des 3D-Strukturelementes ist dabei nur in der XY -Ebene zulässig und angrenzende Voxel, die über dem Zentralvoxel $V(i,j,k)$ mit $k+1$ liegen, bleiben unberücksichtigt, um das Hinzufügen von Bäumen zum Bodensegment zu vermeiden. Die Nachbarschaft erster Ordnung ist ausreichend, sobald die Rasterweite des DGM kleiner ist als die Kantenlänge eines Voxels. Sobald das DGM-Raster jedoch größer ist als eine Voxelkantenlänge, entscheidet das Verhältnis O_N der DGM-Rasterweite R_{DGM} zur Voxelgröße R_{Voxel} , mit welcher Nachbarschaftsordnung die Konnektivitätsanalyse durchgeführt wird, um alle Bodenvoxel dem Segment 'Boden' hinzuzufügen:

$$O_N = \frac{R_{DGM} / R_{Voxel}}{2} \quad (5.9)$$

Die restlichen Voxel werden einer erneuten Konnektivitätsanalyse mit den Nachbarn erster Ordnung unterzogen und so Segmente mit zusammenhängenden Voxeln gebildet. Im Kronenbereich führt dies aufgrund von Verdeckungen zu mehreren kleinen Segmenten. Dem wird entgegengewirkt durch iteratives Hinzufügen kleinerer Segmente zu größeren, wenn die 2D-Distanz zweier Segmentschwerpunkte unterhalb eines benutzerdefinierten Grenzwertes s_{max} liegt. Das Endergebnis sind Voxelsegmente, die bestenfalls einen Baum repräsentieren. In der praktischen Umsetzung entstehen neben den so fast vollständig segmentierten Bäumen kleinere Voxelsegmente, die trotz Zusammenfassen übrig bleiben.

5.3.5 Segmentierung in der 3D-Punktwolke

Aufgrund der unterschiedlichen Entfernungen der Bäume zum Scannerstandpunkt werden innerhalb einer Single-Scan-Aufnahme unterschiedliche Punktdichten auf der Stamm-, Ast- und Kronenoberfläche erzeugt. Dies macht eine automatisierte Segmentierung, also die Anwendung von morphologischen Operatoren und Techniken der Bildverarbeitung, innerhalb dieser unorganisierten Punktwolke fast unmöglich. Denkbar ist ein erweiterter 3D-Separierungsalgorithmus, wie er in Abschnitt 5.3.2.1 vorgestellt wurde. Um diesen erfolgreich anzuwenden, sind räumlich getrennte Bäume eine Grundvoraussetzung. Ineinandergreifende Kronen benachbarter Bäume erschweren die Baumdetektion, da die Punktuche über einen konstanten Abstand erfolgt. Ebenfalls müssen vorher die Bodenpunkte über das erstellte DGM entfernt werden, um ein Ausbreiten der Segmente über die Bodenpunkte zu vermeiden.

Eine weitere Möglichkeit ist die interaktive Segmentierung innerhalb der Punktwolke. Allerdings ist diese Vorgehensweise nicht gleichwertig mit den oben genannten Ansätzen, da keine automatische Segmentierung stattfindet und ein hoher Zeitaufwand erforderlich ist. Mit Hilfe von 3D-Bearbeitungsprogrammen, wie z. B. die Steuerprogramme der Laserscanner, werden die Punkte die einem Baum zugehörig sind, markiert und selektiert (Hopkinson et al., 2004). Durch die interaktive Selektion eines geübten Bearbeiters werden selbst ineinanderragende Kronen richtig separiert. Die Anwendung vorhandener Klassifikationsroutinen und somit eine Einteilung in Gelände, Stamm und unterschiedliche Vegetationshöhen unterstützt die manuelle Selektion (Watt et al., 2005).

5.4 Stammdurchmesserbestimmung

Der Stammquerschnitt weist verschiedene Formen auf (Kramer & Akça, 2008) und wird je nach Scanauflösung durch mehrere tausend 3D-Laserscannerpunkte beschrieben. Bei dem manuellen Abgriff am Stamm wird vereinfacht von einer kreisförmigen Grundfläche ausgegangen, deren Parameter mittels Kluppe und Umfangmessband bestimmt werden. Allerdings gibt es Abweichungen der kreisförmigen Grundfläche aufgrund von Wachstum und Holzfehlern. Idealerweise kommen dann Ellipsen oder gar konvexe Hüllen der Beschreibung der Grundfläche am nächsten. Ein wichtiger Parameter im Forst ist die Grundfläche eines Stammes. Indirekt durch BHD-Messungen ableitbar, ist die Grundfläche bei einem 3%igen Durchmesserfehler mit einem 6%igen Fehler in der Fläche behaftet (Zöhler, 1980). Die Bestimmung eines Stammdurchmessers in definierter Höhe ist an die Bestimmung des Baumfußpunktes gekoppelt, der

die Grundlage der Ableitung bildet. Die folgenden Methoden stellen Möglichkeiten der interaktiven und automatischen Durchmesserbestimmung dar.

5.4.1 Baumfußpunkt

Laut Definition wird der BHD bei geneigtem Gelände von der hangaufwärtsliegenden Baumseite gemessen. Definiert man den tiefsten Punkt (Abbildung 5.16, roter Punkt) innerhalb eines Baumzylinders als Baumfußpunkt, birgt dies Fehler bei geneigtem Gelände. Auch Streupunkte unterhalb der Geländeoberfläche, die aufgrund von Mehrdeutigkeiten bei der Distanzmessung mit Phasenvergleichsverfahren auftreten, bringen bei der Annahme des tiefsten Punktes Fehler. Die Bestimmung des Baumfußpunktes in der richtigen Höhe geschieht über eine ausgleichende Ebene Σ der angrenzenden Bodenpunkte. Die Position sowie der Durchmesser des Baumes sind aus der Baumdetektion (Abschnitt 5.3.2) näherungsweise bekannt. Diese beiden Informationen werden verwendet, um ein dichtes Baum-DGM mit einer Rastergröße von 5 cm innerhalb der separierten Baumpunktwolken zu bestimmen. Es werden alle Punkte, deren horizontaler Abstand zur Baumposition größer als der Durchmesser plus ein konstanter Puffer d_{Puffer} ist, zur Filterung herangezogen. Diese Vorgehensweise lässt zudem die vom Wurzelanlauf beeinflussten Punkte außer Acht. Der Wert des tiefsten Punktes innerhalb einer Rasterzelle bildet die Höhe der Rasterzellenkoordinate. Nach der Filterung der Ausreißer (Median-Filter) wird mit den Baum-DGM-Punkten eine ausgleichende Ebene berechnet. Der Gradient g der Ebene Σ , der die Richtung des steilsten Anstieges repräsentiert, wird in die Näherungsposition des Baumes verschoben. An der Position der hangaufwärtsliegenden Verlängerung des Gradienten bis zum Durchmesserwert plus d_{Puffer} wird der Punkt abgelotet und in Höhe des nächsten Baum-DGM-Punktes angebracht (Abbildung 5.16, blauer Punkt). Liegen an der Stelle keine Baum-DGM-Punkte aufgrund von Scanschatten vor, wird der Durchstoßpunkt der ausgleichenden Ebene mit dem Lot als Baumfußpunkt verwendet. Aufgrund von Bodenvegetation ist, im Vergleich zu manuellen Messungen, tendenziell ein zu hoch gelegener Fußpunkt zu erwarten.

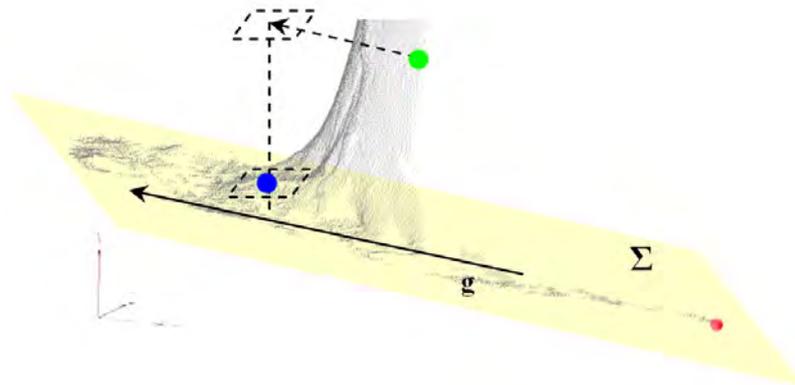


Abbildung 5.16: Baumfußpunktbestimmung (Bienert et al., 2006).

5.4.2 Interaktive Messung

Unter der interaktiven Messung des Durchmessers versteht man das Abgreifen von Messwerten in den Laserscannerdaten. Annähernd alle Steuerprogramme der Laserscanner ermöglichen durch Abgreifen diskreter Punkte die Berechnung räumlicher Distanzen (Abbildung 5.17). Bei freier Sicht auf den Baumstamm lässt sich in den Laserscannerdaten durch Messung der beiden äußeren Punkte der Radius ableiten (Wezyk et al., 2007; Faro, 2006; Weiß, 2009). Je nach Entfernung zum Stamm wird ein Stammsegment unterschiedlicher Größe ($< 180^\circ$) abgebildet (Abschnitt 2.2.1.1). Somit stellt die abgegriffene Entfernung nur eine Näherung an den tatsächlichen Stammdurchmesser dar und wird verkürzt abgegriffen. Die mit dieser Methode erhaltenen Durchmesser werden zu klein bestimmt (Weiß, 2009).

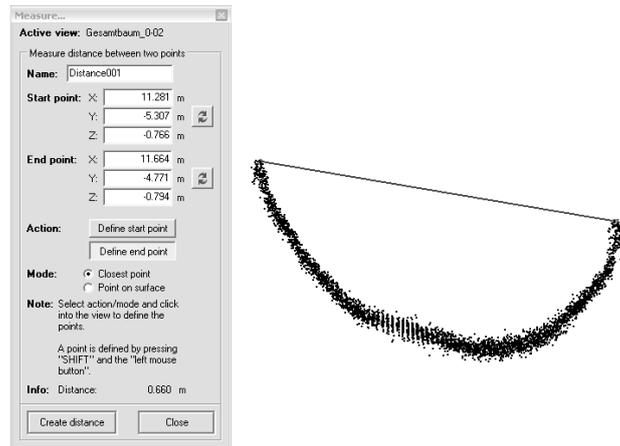


Abbildung 5.17: Interaktive Messung eines Stammdurchmessers mit dem Programm RiSCAN PRO.

Eine weitere Methode zur Durchmesserbestimmung wird in Jutila et al. (2007) vorgestellt. Unter Verwendung der beiden äußeren Punkte wird über den eingeschlossenen Winkel θ der BHD bestimmt. Die Messungen zu den äußeren Baumpunkten bilden die Tangenten an den Stamm, der Durchmesser steht somit senkrecht auf beiden Tangenten (Abbildung 5.18). Über den eingeschlossenen Winkel θ beider Punkte mit dem Laserscanner werden zwei rechtwinklige Dreiecke gebildet. Der Durchmesser d_{BHD} bestimmt sich wie folgt:

$$d_{BHD} = \frac{2s \sin(\theta/2)}{1 - \sin(\theta/2)} \quad (5.10)$$

Der Wert s ergibt sich aus der frontalen Messung und somit kürzesten Distanz zum Stamm. Auch diese Methode setzt eine freie Sicht auf den Stamm voraus.

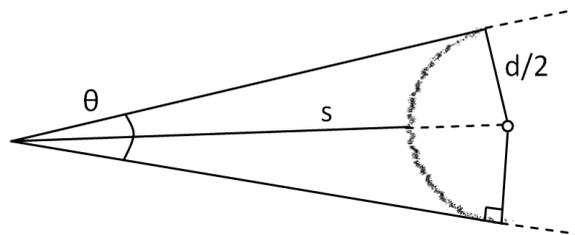


Abbildung 5.18: Trigonometrische Durchmesserbestimmung mit Hilfe der äußeren Stammpunkte (nach Jutila et al., 2007).

5.4.3 Automatische Messung

Die Parametrisierung des Stammes kann zum einen anhand von ausgleichenden Kurven, wie Kreis und Ellipse als Formen des Kegelschnittes, oder durch rotationssymmetrische Körper wie Zylinder und Kegelstümpfe beschrieben werden. Aufgrund der zahlreichen Laserscannerpunkte auf der Stammoberfläche liegt eine Überbestimmung vor, die durch Ausgleichsrechnung zur Parameterschätzung führt. Dies hat zum einen den Vorteil einer sehr genauen Parameterschätzung, trotz verrauschter Daten, und zum anderen führt dies zu einer Datenreduktion, da der Stamm anstatt durch mehrere tausend Punkte durch eine überschaubare Menge an Parametern beschrieben werden kann.

Die folgenden Abschnitte präsentieren die Methoden der Bestimmung des ausgleichenden Kreises und der ausgleichenden Ellipse. Ein Vertreter der 3D-Körper ist der ausgleichende Zylinder. Es werden Ansätze vorgestellt, die über vermittelnde Ausgleichung die Parameter der Kurven und Körper schätzen. Zum generellen Aufbau des

funktionalen und stochastischen Modells einer vermittelnden Ausgleichung wird an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen (z. B.: Reißmann, 1980; Niemeier, 2008).

5.4.3.1 Ausgleichender Kreis

Eine weit verbreitete Methode ist die Bestimmung des Stammdurchmessers mit ausgleichenden Kreisen. Dabei werden in separierte Punktcluster einer horizontalen Punktwolkschicht Kreise eingepasst. Dieser Prozess kann entweder interaktiv durch Funktionen von 3D-Bearbeitungsprogrammen (Watt et al., 2005; Hopkinson et al., 2004) oder automatisiert ablaufen (Thies & Spiecker, 2004; Aschoff et al., 2004; Bienert et al., 2006; Lalonde et al., 2006; Henning & Radtke, 2006a und 2008; Bienert et al., 2007a und 2007b; Király & Brolly, 2007; Maas et al., 2008 u. a.).

Funktionales Modell

Ein Kreis ist definiert durch seinen Mittelpunkt und den Radius. Zur eindeutigen Bestimmung eines Kreises sind drei Punkte notwendig. Da die Anzahl n der Beobachtungen in der Regel größer als die Anzahl der Unbekannten $n_{umb} = 3$ ist, liegt eine Überbestimmung vor. Somit erfolgt die Schätzung der Kreisparameter über ein funktionales und stochastisches Modell.

Die Näherungswerte der Unbekannten werden mit drei beliebig aus der Punktwolke herausgegriffenen Punkten über die allgemeine Kreisgleichung berechnet:

$$(X - X_M)^2 + (Y - Y_M)^2 = r^2 \quad (5.11)$$

Die drei Punkte müssen einen Mindestabstand s_{min} zueinander besitzen, um plausible Näherungswerte für den Mittelpunkt (X_{M0}, Y_{M0}) und den Radius r_0 zu erhalten. Andernfalls werden fortlaufend bis zum Erreichen einer maximalen Anzahl neue Zufallspunkte herausgegriffen. Die Punkte i beschreiben einen Abstand d_i zum Kreis durch die nicht-lineare Gleichung:

$$d_i = r_i - r = \sqrt{(X_i - X_M)^2 + (Y_i - Y_M)^2} - r \quad (5.12)$$

Die Minimierung aller Beobachtungen d_i führt zum ausgleichenden Kreis. Die Koeffizientenmatrix \mathbf{A} der Dimension $n \times 3$ setzt sich aus den drei Näherungswerten und n Datenpunkten zusammen:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{X_i - X_{M0}}{r_i} & -\frac{Y_i - Y_{M0}}{r_i} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{X_n - X_{M0}}{r_n} & -\frac{Y_n - Y_{M0}}{r_n} & -1 \end{bmatrix} \text{ mit } i = 0, \dots, n \quad (5.13)$$

Der Beobachtungsvektor \mathbf{l} ergibt sich aus den Beobachtungen der Gleichung 5.13. Durch ein iteratives Vorgehen werden die Zuschläge über eine vermittelnde Ausgleichung zu den Unbekannten berechnet. In Abbildung 5.19 ist der ausgleichende Kreis sowie die ausgleichende Ellipse einer Punktwolkschicht einer Single-Scan-Aufnahme dargestellt.

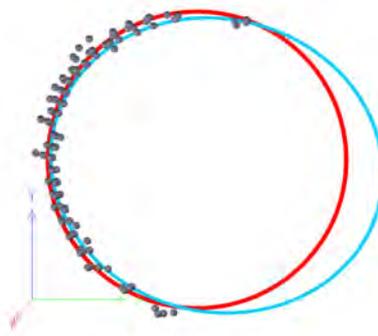


Abbildung 5.19: Ausgleichender Kreis im Vergleich zur ausgleichenden Ellipse einer Punktwolke eines Standpunktes.

Prozessierung an einem Stamm

Die Kreiseinpassung zur Bestimmung eines Stammdurchmessers läuft nach erfolgreicher DGM-Generierung automatisiert ab und unterteilt sich in sechs Schritte:

- 1) **Schichtgenerierung:** In 1,30 m über dem Baumfußpunkt wird eine Schicht mit der Höhe sh herausgefiltert.
- 2) **Näherungswertbestimmung:** Mit drei zufällig ausgewählten Laserscannerpunkten der Schicht; Voraussetzung: Abstand der Punkte $> s_{min}$.
- 3) **Iterative Bestimmung der Zuschläge zu den Unbekannten über vermittelnde Ausgleichung:** Abbruch, wenn die Zuschläge zu den Unbekannten einen vorgegebenen Wert unterschreiten (Konvergenz) oder wenn eine Maximalanzahl an Iterationen erreicht ist.
- 4) **Ausreißertest durch Analyse der Verbesserungen:** Der Punkt mit der größten Verbesserung wird aus der Punktliste entfernt und eine erneute Ausgleichung wird durchgeführt. Wiederholung des 2. und 3. Schrittes, bis alle Verbesserungen unter einem zuvor bestimmten Grenzwert v_{max} liegen oder eine Mindestpunktzahl n_{min} unterschritten wird.
- 5) **Überprüfung der Krümmungsrichtung bei Single-Scan-Daten:** Liegt ein besonders flacher Stammausschnitt vor, kann es vorkommen, dass der Kreis auf der entgegengesetzten Seite eingepasst wird. Ist der Abstand des Kreismittelpunktes P_M zum Scanner kleiner als der mittlere Abstand dreier beliebiger Datenpunkte der Schicht, wird der Kreis an der Stammaußenseite eingepasst (Abbildung 5.20). Es kommt zu einer Ablehnung der Durchmesserbestimmung.
- 6) **Bestimmung der Höhe der nächsten Schicht:** In Abhängigkeit von der Schichthöhe sh sowie der definierten Profilabstände wird zunächst der untere Stammbereich und dann der obere Stammbereich, ausgehend von der Brusthöhe, in Schichten eingeteilt. Die Filterung der Schichtpunkte des darauf folgenden Profils wird aufgrund der vorhergehenden Durchmesserberechnung eingeschränkt, um das Selektieren unnötiger Astpunkte zu vermeiden.

Ein Kreis gilt als erfolgreich eingepasst, sobald drei Kriterien erfüllt sind. Zum einen darf die Standardabweichung der Kreisausgleichung einen vorgegebenen Wert nicht überschreiten und zum anderen muss der eingepasste Durchmesser eine richtige Krümmungsrichtung aufweisen und größer als die Derbholzgrenze sein (> 7 cm). Das Einpassen eines weiteren Kreises in der darauf folgenden Höhe stoppt, sobald 20 hintereinander fehlgeschlagene Kreisausgleichungen registriert wurden.

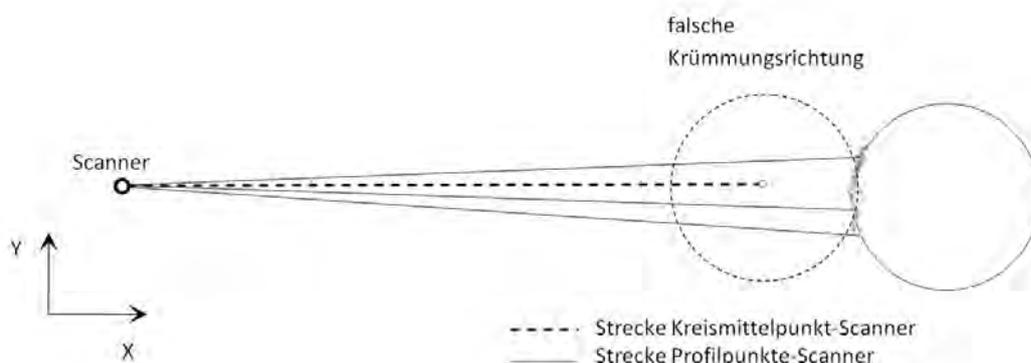


Abbildung 5.20: Überprüfung der Krümmungsrichtung des ausgleichenden Kreises.

Ansätze zur Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung

Die Rundheit eines Stammes variiert mit der vorliegenden Baumart. Beispielsweise zeichnen sich Buchen durch einen unregelmäßigen Verlauf, d. h. durch einen abgeflachten Stamm, aus. Aber auch Astnarben können zu einer fehlerhaften Berechnung des Durchmessers führen. Zur Kontrolle der ermittelten Durchmesser werden die Genauigkeitsangaben der Kreisgleichung verwendet. Die Standardabweichung $\hat{\sigma}_o$ der Kreisgleichung gibt Aufschluss über die Genauigkeit der Durchmesserberechnung, nicht aber über die Richtigkeit der Kreiseinpassung in den tatsächlich vorliegenden Stamm. Da die Durchmesserbestimmung auch von der Anzahl und der Verteilung der Punkte im Kreissegment abhängig ist, wird ein Qualitätsmaß P_d eingeführt (Bienert et al., 2007b), um Durchmesser mit geringer Zuverlässigkeit besser zu detektieren. Folgende Faktoren werden bei der Berechnung von P_d berücksichtigt:

- die Standardabweichung $\hat{\sigma}_o$ der Kreisgleichung,
- die Standardabweichung des ermittelten Durchmessers $\hat{\sigma}_d$,
- der Zentriwinkel μ des abgedeckten Kreissegments bei Single-Scan-Aufnahmen,
- das Verhältnis $P_{\%}$ der Ist-Anzahl zur Soll-Anzahl der zur Ausgleichung verwendeten Punkte,
- ein Median-Filter über die vertikal benachbarten Stammdurchmesser.

In die Berechnung von P_d fließen neben der Standardabweichung $\hat{\sigma}_o$ der Ausgleichung und der Standardabweichung $\hat{\sigma}_d$ des Durchmessers auch Informationen über die Anzahl und die Anordnung der Punkte im Profil mit ein. Über die zwei äußeren Punkte der 2D-Projektion eines Stammprofils und den ausgeglichenen Kreismittelpunkt wird der Zentriwinkel μ des zur Durchmesserberechnung vorliegenden Kreissegments berechnet (Abbildung 5.21 a). Unterbrechungen im Punktverlauf, hervorgerufen durch Verdeckungen von Ästen und Blättern, welche größer sind als ein zuvor bestimmter Grenzwert, werden ebenfalls registriert. Für jeden Punkt im Profil wird der sich ergebende Zentriwinkel zu einem festen Randpunkt bestimmt (Abbildung 5.21 b). Der Winkelvergleich benachbarter Laserscannerpunkte detektiert Lücken im Verlauf. Größere Verdeckungen, die das Profil in der Höhe nicht komplett durchziehen, können in der 2D-Projektion daher nicht detektiert werden (Abbildung 5.21 c und d). Um Aussagen über Unregelmäßigkeiten im Abstand der Profilmuster zu erhalten, wird das Verhältnis der Ist-Anzahl zu der Soll-Anzahl der zur Ausgleichung verwendeten Punkte angegeben. Dabei ergibt sich die Soll-Anzahl über die zuvor berechnete Scanauflösung und die Fläche des Profilausschnittes.



Abbildung 5.21: a) Definition des Zentriwinkels μ ; b) und c) 2D-Projektion von Stammprofilen; d) perspektivische Ansicht der Stammschicht aus c) (Bienert et al., 2007a).

Die fünf Eingangsgrößen, die zur Berechnung von P_d verwendet werden, werden mit den maximal zulässigen Grenzwerten normiert und von 1 subtrahiert. Dies geschieht für die Parameter $P_{\hat{\sigma}_0}$, $P_{\hat{\sigma}_d}$ und P_μ :

$$P_{\hat{\sigma}_0} = 1 - \frac{\hat{\sigma}_0}{\sigma_{0max}} \quad (5.14)$$

$$P_{\hat{\sigma}_d} = 1 - \frac{\hat{\sigma}_d}{\sigma_{dmax}} \quad (5.15)$$

Dabei sind σ_{0max} und σ_{dmax} die maximal zulässigen Genauigkeitswerte der Kreisausgleichung und in Abhängigkeit von der Distanzmessgenauigkeit des verwendeten Laserscanners festzusetzen. Der Grenzwert μ_{max} für den Zentriwinkel ergibt sich bei einer Single-Scan-Aufnahme aus der Entfernung und dem Stammdurchmesser (Abschnitt 2.2.1.1).

$$P_\mu = 1 - \frac{\mu}{\mu_{max}} \quad (5.16)$$

Einen weiteren Einfluss auf die Größe des Parameters P_d hat der aktuelle Durchmesser im Vergleich zu seinen Nachbarn (Abbildung 5.22). Die in einem konstanten Abstand berechneten Durchmesser eines Stammes werden mit einem Median-Filter (Kernel: 5x1) der Höhe nach durchlaufen. Weicht der Durchmesser um mehr als 10 % vom Medianwert ab, ist der Einfluss von P_{Median} an der Berechnung von P_d gleich 0, andernfalls wird der Parameter $P_{Median} = 1$ gesetzt.

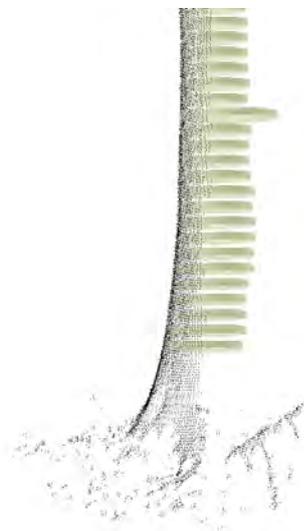


Abbildung 5.22: Stammdurchmesser mit einem Ausreißer.

Letztendlich setzt sich der Parameter P_d aus den Einzelparametern zusammen:

$$P_d = \frac{P_{\hat{\sigma}_0} + P_{\hat{\sigma}_d} + P_{\mu} + P_{\%} + P_{Median}}{5} \quad (5.17)$$

Der Wertebereich von P_d liegt zwischen 0 und 1. Durchmesser mit einem Parameter zwischen 0,7 und 1 gelten als zuverlässig berechnete Werte. Es wird ersichtlich, dass die Einzelparameter mit dem gleichen Gewicht in die Berechnung eingehen. Die Bestimmung über die fünfte Wurzel des Produkts der Parameter hat den Vorteil, das Parameter mit geringem Wert einen größeren Einfluss auf die Berechnung haben. Allerdings ist dann von Nachteil, dass, sobald ein Parameter 0 wird, d. h. der maximal zulässige Grenzwert überschritten ist, das Qualitätsmaß ebenfalls 0 wird.

$$P_d = \sqrt[5]{P_{\hat{\sigma}_0} P_{\hat{\sigma}_d} P_{\mu} P_{\%} P_{Median}} \quad (5.18)$$

5.4.3.2 Ausgleichende Ellipse

Ein weiterer Vertreter der Kegelschnitte ist die Ellipse, die durch fünf Parameter definiert ist (Abbildung 5.23). Zu den Ellipsenparametern gehören der Ellipsenmittelpunkt $P_{MP}(X_M, Y_M)$, eine große und eine kleine Halbachse (a, b) sowie ein Drehwinkel α , der die Rotation der großen Halbachse zur X -Achse angibt.

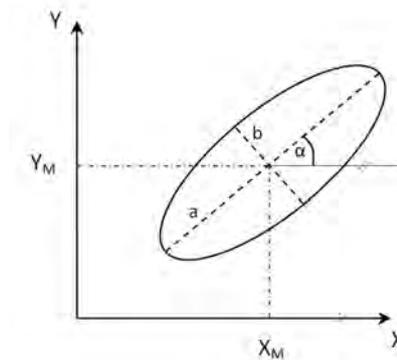


Abbildung 5.23: Definition einer gedrehten Ellipse.

Zur eindeutigen Lösung der Ellipse sind fünf Punkte der Ellipsenbahn erforderlich. Ein Ansatz zur Berechnung einer ausgleichenden Ellipse ist in Luhmann (2003) gegeben. Aus der allgemeinen Kegelschnittgleichung ergibt sich die lineare Beobachtungsgleichung eines Punktes P_i zu:

$$AX_i^2 + 2BX_iY_i + CY_i^2 + 2DX_i + 2EY_i = -F \quad (5.19)$$

Unter der Annahme einer nicht gedrehten Ellipse sind die Bedingungen $\mathbf{B} = 0$ und $\text{sign}\mathbf{A} = \text{sign}\mathbf{B}$ erfüllt. Es wird von einer nicht gedrehten Ellipse in einem Hilfskoordinatensystem ausgegangen, dessen Ursprung im Ellipsenmittelpunkt liegt. Die Koeffizientenmatrix \mathbf{A} der Dimension $n \times 5$ ergibt sich aus den Differential-quotienten zu:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_i^2 & X_iY_i & Y_i^2 & X_i & Y_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^2 & X_nY_n & Y_n^2 & X_n & Y_n \end{bmatrix} \text{ mit } i=0, \dots, n \quad (5.20)$$

Mit den ausgeglichenen Parametern A, B, C, D und E werden der Drehwinkel α sowie die Halbachsen a und b des Ausgangssystems berechnet.

$$\alpha = \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{B}{A-C}\right)}{2} \quad (5.21)$$

$$a = \sqrt{\frac{CD^2 + AE^2 - ACF}{A^2 C}} \text{ und } b = \sqrt{\frac{CD^2 + AE^2 - ACF}{A C^2}} \quad (5.22)$$

Der Ellipsenmittelpunkt ergibt sich aus dem Schwerpunkt $P_0(X_0, Y_0)$ aller Punkte zu:

$$X_M = X_0 - \frac{D}{A} \cos \alpha + \frac{E}{C} \sin \alpha \quad (5.23)$$

und

$$Y_M = Y_0 - \frac{D}{A} \sin \alpha - \frac{E}{C} \cos \alpha \quad (5.24)$$

Eine in Matlab implementierte Methode von Fitzgibbon (1999) ermöglicht ebenfalls die Berechnung einer ausgleichenden Ellipse. Die Minimierung der Beobachtungsgleichung (5.19) wird durch ein Eigenwertproblem gelöst. Als Bedingung muss eine negative Diskriminante vorliegen:

$$b^2 - 4ac = -1 \quad (5.25)$$

Daraus definiert sich die Matrix \mathbf{C} mit den Randbedingungen:

$$\mathbf{C}(0,2) = -2; \mathbf{C}(1,1) = 1; \mathbf{C}(2,0) = -2 \quad (5.26)$$

Die restlichen Matrixelemente der 6×6 großen Matrix sind mit Nullen aufgefüllt. Mit der Koeffizientenmatrix \mathbf{A} (5.20), die um eine Spalte mit Einsen, für den Parameter F , erweitert wird, mit dem Eigenvektor \mathbf{a} , dem Eigenwert λ und mit der Matrix \mathbf{C} mit den Randbedingungen, wird folgendes Eigenwertproblem aufgestellt:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{a} = \lambda \mathbf{C} \mathbf{a} \quad (5.27)$$

Die Lösung trägt zu einem einzigen negativen Eigenwert λ bei, dessen korrespondierender Eigenvektor zur Lösung der Ellipsenparameter beiträgt. Für eine detailliertere Beschreibung des Algorithmus wird auf Fitzgibbon (1999) verwiesen.

Letztendlich wird der Stammdurchmesser bei Single-Scan-Datensätzen nur durch eine der beiden Halbachsen repräsentiert. Das Verhältnis $a : b$ der beiden Halbachsen zueinander deckt eine Überparametrisierung der Ellipseneinpassung auf und gibt Auskunft, ob gegebenenfalls die Anwendung eines ausgleichenden Kreises geeigneter wäre.

5.4.3.3 Ausgleichender Zylinder

Durch einen Punkt $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$, einen Richtungsvektor $\mathbf{v}(a, b, c)$ und einen Radius r ist ein Zylindersegment definiert (Abbildung 5.24). Ein beliebig im Raum gedrehtes Zylindersegment wird somit durch sieben Parameter beschrieben.

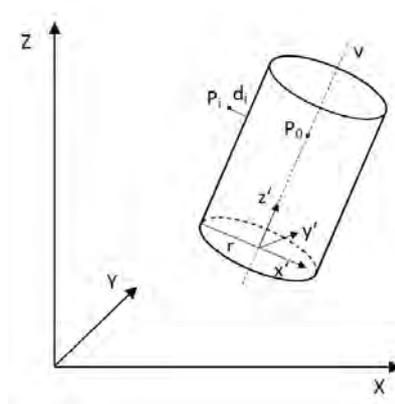


Abbildung 5.24: Definition eines beliebigen Zylinders.

Für den Sonderfall eines vertikal stehenden Zylinders, mit einer parallelen Zylinderachse zur Z-Achse gelten die nachfolgenden Vereinfachungen. Geht man von einem normierten Richtungsvektor mit:

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1 \quad (5.28)$$

aus, erhält man einen Richtungsvektor mit zwei linear unabhängigen Richtungsparametern $(a, b, 1)$.

Substituiert man die Z-Komponente des Punktes P_0 mit:

$$Z_0 = -a X_0 - b Y_0 \quad (5.29)$$

dann reduziert sich die Anzahl der Parameter auf fünf linear unabhängige Zylinderparameter (Luhmann, 2003). Somit sind zu einer eindeutigen Zylinderlösung fünf Punkte notwendig. Eine Überbestimmung führt wie in den vorher vorgestellten Algorithmen zur Parameterschätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Die Laserscannerpunkte werden zunächst in den Ursprung des Hilfssystems verschoben und rotiert, sodass ein vertikal ausgerichteter Zylinder in die Punkte eingepasst werden kann. Nach erfolgter Transformation wird der Näherungswert für den Zylinderradius aus drei beliebig verteilten Punkten eines projizierten Horizontalschnittes mittels umgestellter Kreisgleichung (5.11) bestimmt. In Analogie zum ausgleichenden Kreis und zu den Vereinfachungen (5.28, 5.29), mit $X_0 = 0$, $Y_0 = 0$ und $a = 0$ und $b = 0$, ergibt sich die nicht-lineare Beobachtungsgleichung zu :

$$d_i = r_i - r = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} - r \quad (5.30)$$

Die Koeffizientenmatrix \mathbf{A} der Dimension $n \times 5$ ergibt sich aus den Differentialquotienten der Beobachtungsgleichung wie folgt:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{X_i}{r_i} & -\frac{Y_i}{r_i} & -\frac{X_i Z_i}{r_i} & -\frac{Y_i Z_i}{r_i} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{X_n}{r_n} & -\frac{Y_n}{r_n} & -\frac{X_n Z_n}{r_n} & -\frac{Y_n Z_n}{r_n} & -1 \end{bmatrix} \quad \text{mit } i = 0, \dots, n \quad (5.31)$$

Der Beobachtungsvektor \mathbf{l} ergibt sich aus der Gleichung 5.30 mit dem Näherungsradius r . Die Zuschläge zu den Unbekannten werden solange iterativ berechnet, bis keine signifikante Änderung mehr auftritt oder eine maximale Anzahl an Iterationen erreicht ist. Abschließend werden die Punkte in das Ausgangssystem zurücktransformiert. Auch hier kann ein Ausreißertest durch Analyse des Verbesserungsvektors \mathbf{v} bei stark verrauschten Daten zu einer besseren Einpassung des Zylinders führen.

In Späth (2000) wird ein Verfahren vorgestellt, das die Punktkoordinaten parametrisch durch den Zylindermittelpunkt und den Radius sowie die zwei Raumwinkel beschreibt. Dadurch ergeben sich neben den eigentlichen fünf Zylinderparametern $2n$ Unbekannte, da zu jedem Laserscannerpunkt zusätzlich die Raumwinkel t und u bestimmt werden müssen. Das Verfahren hat den Vorteil, dass die Bestimmung des gedrehten Zylinders ohne vorherige Transformation in einem Fluss geschieht.

5.4.3.4 Kreissehnen

Eine rein geometrische Durchmesserbestimmung ist unter Verwendung von Kreissehnen möglich. Der in Kuchenbecker (2011) vorgestellte Algorithmus basiert auf der Tatsache, dass sich die Mittelsenkrechten zweier Kreissehnen im Kreismittelpunkt schneiden (Abbildung 5.25).

X_M und Y_M berechnen sich aus den Anstiegen m_{MSi} der beiden Mittelsenkrechten sowie deren Schnittpunkten n_{MSi} mit der Y -Achse wie folgt:

$$X_M = \frac{n_{MSi+1} - n_{MSi}}{m_{MSi} - m_{MSi+1}} \quad (5.32)$$

$$Y_M = m_{MSi} X_M + n_{MSi} \quad (5.33)$$

Der Anstieg m_{MSi} der Mittelsenkrechten ergibt sich aus dem negativen reziproken Anstieg der jeweiligen Kreissehne i :

$$m_{MSi} = -\frac{X_B - X_A}{Y_B - Y_A} \quad (5.34)$$

Den Schnittpunkt einer Mittelsenkrechten mit der Y -Achse erhält man durch Einsetzen des Sehnenmittelpunktes P_{Si} (X_{Si}, Y_{Si}) und des mit (5.34) ermittelten Anstieges in die kartesische Normalform der Geradengleichung:

$$n_{MSi} = Y_{Si} - m_{MSi} X_{Si} \quad (5.35)$$

Iterativ werden nun beliebige Sehnenpaare gebildet und der Mittelpunkt bestimmt. Dies geschieht so lange, bis eine Maximalanzahl erreicht ist oder der mittlere Punktlagefehler aller Mittelpunkte einen bestimmten Grenzwert unterschreitet. Das arithmetische Mittel aller berechneten Mittelpunkte definiert den detektierten Mittelpunkt. Der Radius r berechnet sich aus dem arithmetischen Mittel der Abstände des Mittelpunkts zu jedem Laserscannerpunkt.

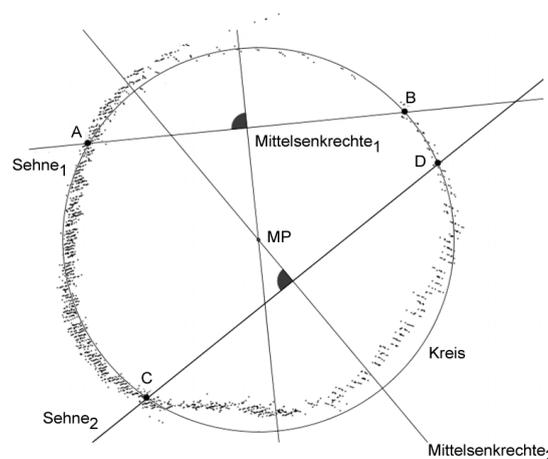


Abbildung 5.25: Prinzip der Kreisbestimmung über Mittelsenkrechte (modifizierte Abbildung in Anlehnung an Kuchenbecker (2011)).

5.4.3.5 Konvexe Hülle

Die konvexe Hülle ist ein umhüllendes Polygon von Punkten, das durch eine positive Krümmung gekennzeichnet ist. Eine Reihe von Algorithmen zur Bildung von konvexen Hüllen ist bekannt. Algorithmen wie *Quick-Hull* und *Divide and Conquer* sollen an der Stelle nur genannt werden. Der Algorithmus *Gift Wrapping* wurde 1973 von Jarvis entwickelt und nutzt nach der Y -Koordinate sortierte Punktdaten als Basis. Ausgehend vom Punkt P_0 mit der kleinsten Y -Koordinate wird zu allen weiteren Punkten der Polarwinkel berechnet. Der Punkt mit dem kleinsten Polarwinkel bildet einen Stützpunkt der konvexen Hülle. Ausgehend von diesem Punkt wird erneut der kleinste Polarwinkel gesucht. Dieser Berechnungsschritt wird so lange wiederholt, bis letztendlich der Ausgangspunkt P_0 erreicht und die konvexe Hülle geschlossen ist. Die Länge des Polygons aller Punkte repräsentiert näherungsweise den Umfang u des Stammes. Unter Annahme eines kreisförmigen Stammquerschnittes ergibt sich aus der Kreisformel der Durchmesser d_{BHD} :

$$d_{BHD} = \frac{u}{\pi} \quad (5.36)$$

Mit Abbildung 5.26 wird ersichtlich, dass diese Methode nur bei geschlossenen, astlosen Stammprofilen erfolgreich arbeitet. Die aufgrund der Distanzmessgenauigkeit, eines schiefstehenden Stammes oder einer stark strukturierten Rinde verrauschten Profile werden bei der Polygonerstellung nicht berücksichtigt. Tendenziell wird dadurch der Durchmesser über den Umfang im Gegensatz zum ausgleichenden Kreis zu groß bestimmt.

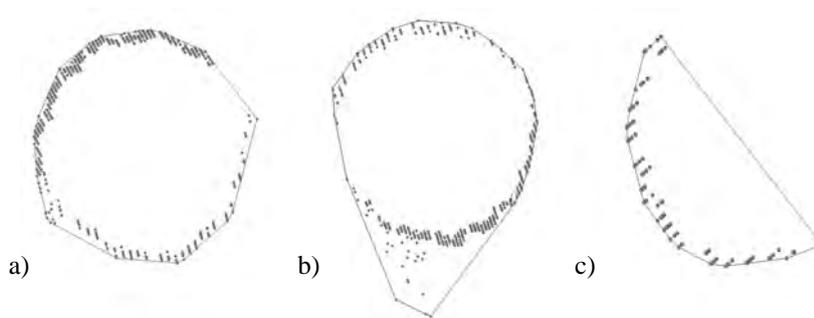


Abbildung 5.26: Darstellungsmöglichkeiten der konvexen Hülle: a) Multiple-Scan-Aufnahme; b) Multiple-Scan-Aufnahme mit Astpunkten; c) Single-Scan-Aufnahme.

Wezyk et al. (2007) präsentieren eine Methode, die über die konvexe Hülle von teilweise verdeckten Stämmen die Stammgrundfläche bestimmt. Das nicht erfasste Kreisbogenstück, bezogen auf den Stammmittelpunkt, wird über das Verhältnis eines Vollkreises zum Winkel des verdeckten Kreisbogens berechnet.

5.4.4 Tabellarische Übersicht der Methoden zur Durchmesserbestimmung

Die folgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Methoden zur Ableitung von Stammdurchmessern aus einer horizontalen Punktwolkschicht. Dabei sind neben den Messelementen die Mindestanzahl an benötigten Laserscannerpunkten sowie problematische Datensätze, die die Algorithmen einschränken, aufgeführt.

Tabelle 4: Übersicht der Methoden der Durchmesserbestimmung.

	Interaktiv		Automatisch			
	Streckenabgriff	Winkelabgriff	Ausgleichender Kreis	Ausgleichende Ellipse	Kreissehnen	Konvexe Hülle
Messung von	2 Randpunkte	Strecke s , Winkel θ	Mittelpunkt X_M, Y_M , Radius r	Halbachsen a, b , Mittelpunkt X_M, Y_M , Winkel α	2 Kreissehnen	keine
Mindestanzahl Laserscannerpunkte	2 Punkte	3 Punkte	3 Punkte	5 Punkte	4 Punkte	5 Punkte verteilt auf 360°
Geeignet für	Single- und Multiple-Scan-Aufnahme		Single- und Multiple-Scan-Aufnahme	Multiple-Scan-Aufnahme	Multiple-Scan-Aufnahme	Multiple-Scan-Aufnahme
Probleme	Verdeckung der äußeren Stammpunkte		Punkte von Ästen oder Blättern neben dem Profil, Querschnittsinhomogenitäten, Ovalität	Punkte von Ästen oder Blättern neben dem Profil	Zu kurze Sehnen bei verrauschten Profilverläufen, zu spitzer Schnittwinkel der Mittelsenkrechten	Punkte von Ästen oder Blättern neben dem Profil

5.5 Bestimmung von Gütekriterien am Stamm

Die Qualitätsbestimmung von Stammholz wird durch eine Güteklassifizierung durchgeführt. Dabei werden Bäume mit einem BHD größer 30 cm bewertet. Während bei Nadelbäumen die unteren 10 m des Stammes, bei Kiefern nur bis 7 m, einer Güteklassifizierung unterzogen werden, sind bei Laubbäumen nur die unteren 5 m qualitätsentscheidend (Mahler et al., 2001). Neben geometrischen Aspekten, wie Schaftform und Astigkeit, beeinflussen Stammschäden sowie das Rindenbild den Wert des Stammholzes. Die Qualität des Holzes ist wertentscheidend und ausschlaggebend für die Weiternutzung als Rund-, Furnier-, Schnitt- oder Energieholz. Im Folgenden werden Möglichkeiten gezeigt, Informationen zur Güte eines Stammes aus den Laserscannerdaten abzuleiten.

5.5.1 Inhomogenitäten im Stammquerschnitt

Die Abweichung von der Rundheit des Stammes ist ein wertmindernder Aspekt. Neben Stammovalitäten und Spannrückigkeit, die die Stammgrundfläche global betreffen, gibt es auch lokal auftretende Stammabweichungen, wie Hohlkehlen, Astnarben, Beulen und Knoten. Durch Abwicklung der Laserscannerdaten auf eine Referenzfläche (bestenfalls ein ausgleichender Kreis/Zylinder) wird eine Rundheitsprüfung durchgeführt. Eine Ovalität des Stammes spiegelt sich in einem sinusförmigen Kurvenverlauf wider. Die Bestimmung des Durchmessers durch Einpassen einer ausgleichenden Ellipse in ein Multiple-Scan-Stammprofil liefert den Vorteil der direkten Ovalitätsbestimmung. Lokale wachstumsbedingte Abweichungen werden durch lokale Maxima oder Minima im Kurvenverlauf detektiert. Auch Schlag-, Fege- und Verbißschäden (Abschnitt 8.2.1) am Stamm gehen mit einem un stetigen Kurvenverlauf der abgewickelten Profilverläufe einher. Allerdings ist zu beachten, dass die Streckenmessungen zu den Punkten mit einem zufälligen Fehler behaftet sind und sich dies in einem Messrauschen auswirkt. Die Punkte des in Abbildung 5.27 dargestellten Stammquerschnittes haben laut Scannerhersteller eine Distanzmessgenauigkeit von 5-10 mm. Je nach Größe der Distanzmessgenauigkeit der Punkte kann sich bei größeren Rinden die Struktur ebenfalls in den abgewickelten Profilverläufen abzeichnen.

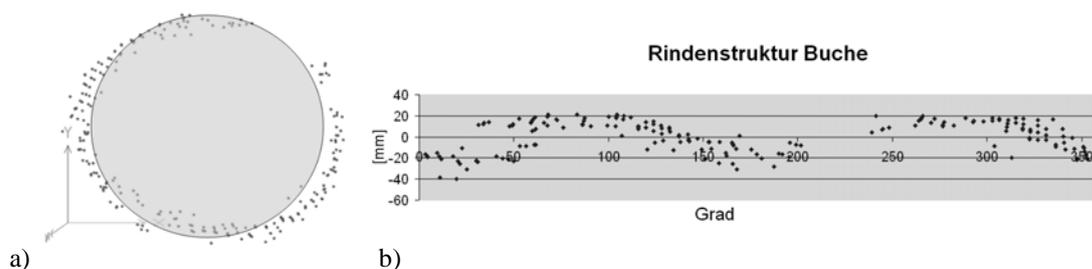


Abbildung 5.27: a) Stammprofil einer Buche mit eingepasstem Kreis; b) Vom Kreis abgewickelte Profilpunkte.

5.5.2 Schaftform

Ein weiterer wertmindernder Faktor ist die Krümmtheit des Stammes. Ein Baum mit einer hohen Güteklasse zeigt einen homogenen und geradlinigen Verlauf im Stammwachstum. Die Krümmung der Baumachse wird durch die Durchmesserbestimmung entlang des Stammes bestimmt. Die Berechnung der Biegelinie (Abschnitt 8.2.3) zeigt die Abweichung der tatsächlichen Stammachse von der lotrecht stehenden Achse. Aus aufeinanderfolgenden Durchmesserberechnungen, wie sie in Abschnitt 5.4.3 vorgestellt wurden, werden Stammbereiche mit einer starken Durchmesserabnahme (Abholzigkeit) aufgedeckt. Unter Verwendung der Schaftforminformationen aus TLS-Daten führt ein krümmungs- und durchmesserbasierter Holzzuschnitt zu einer optimierten Holzausbeute. Bereiche mit extremer Krümmung werden schon vor dem Holzzuschnitt erkannt und die Schnittlänge wird ertragsoptimiert angepasst.

5.5.3 Weitere Faktoren

Schäden der Rinde sind mit Bildverarbeitungsmethoden und Texturanalysen, wie sie in Abschnitt 8.3 vorgestellt werden, aus den abgewickelten Punkten der Stammoberfläche ableitbar. In Schütt et al. (2004 und 2005) wird ein Ansatz präsentiert, der aus Intensitäts- sowie Entfernungsbildern des Stammes potenzielle Stammdefekte semiautomatisch erkennt. Mit Bildsegmentierungsmethoden werden Schadstellen detektiert, die unter Verwendung von geeigneten Trainingsgebieten die Erfolgsquote der Detektion steigert. Die Analyse von Schnittholz mit kombinierten Sensoren (Kamera, Scanner, Röntgengerät) ist ein bewährter Standard in der Holzindustrie (Abschnitt 2.6). Neben farblichen Holzveränderungen durch Pilzbefall sind Wachstumsanomalitäten in der Jahresringanordnung auszumachen.

5.6 Baumhöhenbestimmung

Die Baumhöhe ist neben dem BHD ein entscheidender Baumparameter. Hopkinson et al. (2004) definieren die Baumhöhe als Vektor aus höchstem und niedrigstem Punkt der zuvor von benachbarten Ästen manuell bereinigten Baumpunktwolke. Im Mittel wurden die Bäume 1,5 m zu klein bestimmt. Eine Baumhöhenschätzung mit Schaftformfunktionen auf Basis der ermittelten BHD aus TLS-Daten wird in Aschoff et al. (2004) durchgeführt. Dabei erreichen sie eine mittlere Abweichung von 6 m mit gleichmäßig verteilten Über- und Unterschätzungen der Baumhöhe. Király & Broly (2007) verwenden das digitale Kronenmodell eines jeden Baumes zur Detektion der Baumspitze. Das lokale Maximum des Kronenmodells wird der Baumposition zugeordnet, die der zuvor über den Stammverlauf berechneten Baumspitzenposition am nächsten kommt. Die Baumhöhen wurden mit einem RMS-Fehler von 1,4 m bestimmt.

Zur Bestimmung der Baumhöhe wurden im Rahmen der Arbeit zwei Algorithmen umgesetzt, zum einen die Ableitung aus der Differenz der Baumspitze und des Baumfußpunktes und zum anderen ein histogrammbasierter Ansatz. Es ist zu erwarten, dass tendenziell die Baumhöhen aufgrund von Abschattungen im Kronenbereich zu klein bestimmt werden.

5.6.1 Differenzverfahren

Nach erfolgreicher Baumdetektion wird die Baumhöhe abgeleitet. In Anlehnung an die manuelle Baumhöhenbestimmung wird die Baumhöhe automatisch aus der Differenz der Z-Koordinaten des höchsten Punktes Z_{max} aller Baumpunkte und des Baumfußpunktes $Z_{fu\beta}$ abgeleitet:

$$h_{Baum} = Z_{max} - Z_{fu\beta} \quad (5.37)$$

Wurden die Bäume über Zylinder separiert (Abschnitt 5.3.2.3), können Fehler in der Baumhöhenbestimmung auftreten. Punkte eines höheren benachbarten Baumes, die sich im Zylinder befinden, tragen fälschlicherweise zu einer zu groß bestimmten Baumhöhe bei. Der Zylinderradius ist deshalb an den mittleren Baumabstand des Aufnahmegebiets anzupassen. Dennoch können kleinere, dominierte Bäume der unteren Bestandsschicht den Höhenwert des benachbarten Baumes erhalten (Abbildung 5.28).

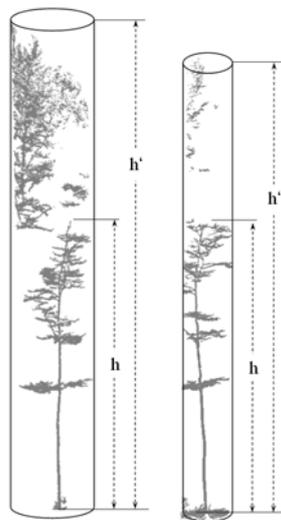


Abbildung 5.28: Fehlerhafte Baumhöhenbestimmung bei dominierten Bäumen im Bestand.

5.6.2 Histogrammbasierter Ansatz

Beim histogrammbasierten Algorithmus werden zum Separieren von Punkten die Laserscannerpunkte entlang der Achse des Zylinders gezählt. Dazu wird der Zylinder in konstanten Schritten durchlaufen und für jede Höhengschicht die Punktzahl gespeichert. Werden mehrere Schichten hintereinander detektiert, die keine Punkte mehr enthalten, wird für die Baumhöhenberechnung die Z-Koordinate der letzten belegten Höhengschicht verwendet. Zu große Baumhöhen, aufgrund von vereinzelt Streupunkten, können unter Verwendung eines Schwellwertes umgangen werden. Ist die Punktzahl der folgenden Höhengschichten kleiner als ein vorgegebener Schwellwert, wird ebenfalls auf die letzte akzeptable Höhengschicht zurückgegriffen. Die Genauigkeit der Baumhöhenbestimmung ist von der Dicke der Höhengschichten abhängig.

5.7 Kronenparameter

5.7.1 Kronenansatzhöhe

Die Analyse des Histogramms aller nach der Höhe abgetragenen Baumpunkte ermöglicht die Bestimmung der Kronenansatzhöhe. Es ist zu erwarten, dass sich mehrere Peaks abzeichnen und die Punktzahl im Bereich der Lichtkrone mit steigender Höhe abnimmt. Das erste Maximum wird in der Regel hervorgerufen von den Bodenpunkten (Abschnitt 5.2.1.1). Der zweite signifikante Peak mit aufsteigender Höhe repräsentiert den Kronenansatz. Global betrachtet entsteht bei einer geschlossenen, homogenen Krone ein bimodales Histogramm, bei dem der Wendepunkt der

aufsteigenden Flanke des zweiten Maximums der Ansatzhöhe entspricht. Eine Filterung und Glättung des Histogramms würde zur Detektion der markanten Histogrammpunkte beitragen.

Um die Detektion eines am Stamm separat ausgebildeten Astes zu vermeiden (Abbildung 5.29, rechts), ist die Breite des Peaks ebenfalls entscheidend. Erst wenn der Peak eine Mindestbreite eines vordefinierten Prozentsatzes der Baumlänge aufweist, handelt es sich um die Kronenansatzhöhe. In Abbildung 5.29 sind die Histogramme zweier Buchen dargestellt. Die abgetragenen Intervalle repräsentieren eine Schicht von 10 cm Höhe. Bei den Beispielbäumen wurden die Bodenpunkte entfernt, die theoretisch einen weiteren Anstieg in Höhe des Bodens auf der Häufigkeitsskala erzeugt hätten.

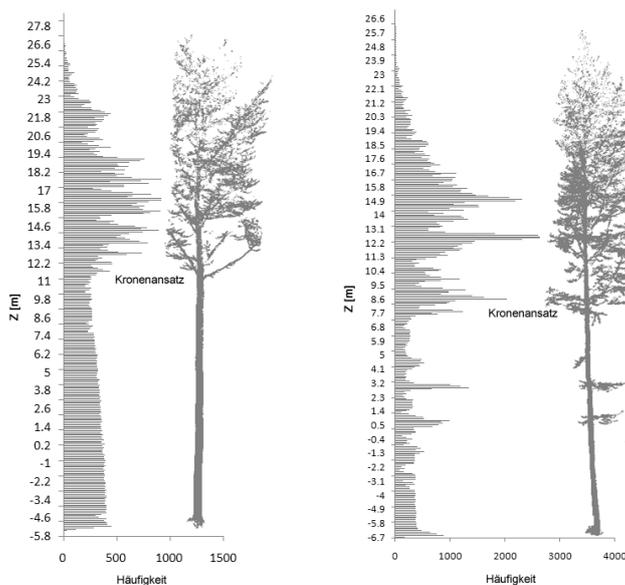


Abbildung 5.29: Häufigkeitsverteilung der TLS-Punkte zweier Buchen in 10 cm Höhengleichungen. Die y-Achsen repräsentieren die Z-Koordinaten der Punktwolken, mit dem Ursprung ($Z = 0$ m) im Laserscanner.

5.7.2 Kronenschirmfläche

Die Berechnung der Kronenschirmfläche lässt sich über die Projektion aller 3D-Kronenpunkte in die XY-Ebene realisieren. Über Polygonstützpunkte, bestimmt aus dem Umringspolygon aller Kronenpunkte, wird die Fläche durch die Gauß'sche Flächenformel (Gleichung 5.38) annähernd berechnet. Mögliche Polygonformen sind konkave und konvexe Hüllen. Konvexe Hüllen führen dabei immer zu einer Überschätzung der Kronenschirmfläche, da herausragende Äste über eine Polygonlinie miteinander verbunden werden. Konkave Hüllen dagegen repräsentieren je nach Generalisierungsgrad die tatsächliche Form der Krone.

$$A = \frac{\sum X_i * (Y_{i+1} - Y_{i-1})}{2} \quad (5.38)$$

Ein Ansatz zur Berechnung einer konkaven Hülle wurde in der Diplomarbeit Stiel (2010) vorgestellt. Ausgehend vom Schwerpunkt der in eine Ebene projizierten Laserscannerpunkte, erfolgt eine Einteilung der Ebene in gleichgroße Winkelsegmente. Die Punkte innerhalb der Segmente mit der größten Distanz zum Schwerpunkt bilden die Stützpunkte des Polygons. Durch Änderung der Segmentgröße wird der Detaillierungsgrad der Kronenschirmfläche beeinflusst. In Abbildung 5.30 ist die Krone eines 7 m hohen Straßenbaumes mit den Projektionsflächen in Auf-, Kreuz- und Grundrissebene dargestellt. Einen ähnlichen Ansatz verwenden Pfeifer et al. (2004) zur Bestimmung von Umringspolygonen in horizontalen Schnitten entlang der Stammachse. Ansätze, die äußere 3D-Kronenhülle zu repräsentieren, sind über 3D-Alpha Shapes möglich (Zhu et al., 2008).

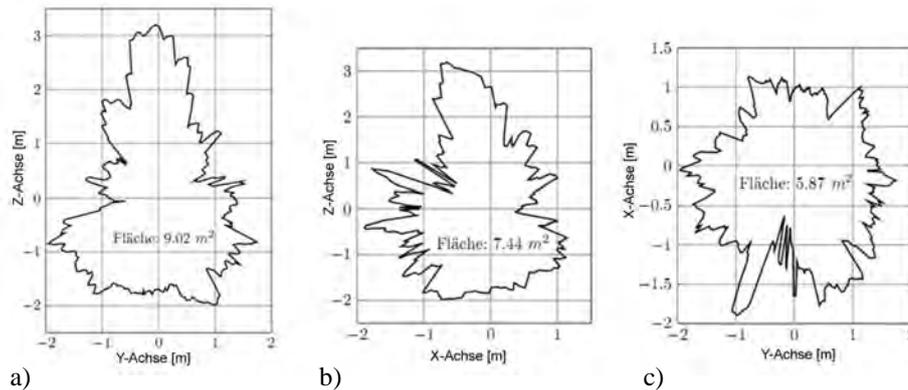


Abbildung 5.30: Kronenschirmflächen eines Straßenbaumes in a) Auf-, b) Kreuz-, und c) Grundrissebene, abgeleitet aus einer Single-Scan-Aufnahme (Stiel, 2010).

Fleck et al. (2007) berichten von einer tendenziell zu klein bestimmten Kronenfläche bei der Verwendung von Kronenpolygonen aus TLS-Daten im Vergleich zu manuellen Kronenablotungen über acht Punkte, aufgrund von Verdeckungen im Kronenraum. Dieser Effekt könnte durch ein umhüllendes Polygon geringerer Ordnung berücksichtigt werden.

Anhand der 3D-Punktwolke einer Single-Scan-Aufnahme ist im Folgenden der Einfluss der Polygonform dargestellt. Für die Grundrissebene wurde vergleichend der Flächeninhalt einer konvexen sowie konkaven Hülle (mit Stützpunkten im Abstand von 1°) bestimmt. Dabei trat eine Differenz von knapp $2,5 \text{ m}^2$ auf (Abbildung 5.31).

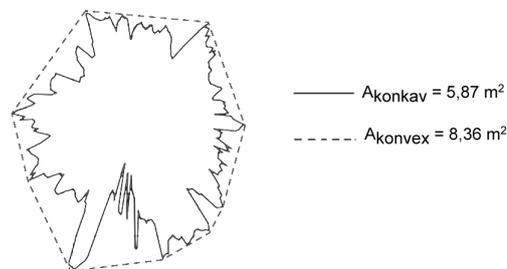


Abbildung 5.31: Konkave und konvexe Hülle der Kronenschirmfläche eines 7 m hohen Straßenbaumes.

Die Projektion der Kronenpunkte der Laserscannerdaten ist im Vergleich zu umständlichen Erfassungsmethoden mit klassischen Messinstrumenten eine schnelle und effiziente Methode, aus den Punktwolken beliebige Projektionsansichten abzuleiten. Das Verfahren lässt sich sehr gut auf Einzelbäume anwenden und führt bei Bäumen im Bestand nur zu einem Ergebnis, solange die Kronen räumlich voneinander getrennt sind. Verdeckungen innerhalb der Kronenstruktur sind für die Ableitung der Kronenschirmfläche vernachlässigbar, da bei dieser Anwendung die äußere Hülle der Krone von Interesse ist. Bei sehr dichten Kronen bietet sich die Aufnahme von mindestens zwei diametralen Blickrichtungen an. Eine Überführung der Punktwolke in ein lotrechtes Koordinatensystem, bei dem die Stammachse parallel zur Z-Achse verläuft, bringt eine schnelle und unkomplizierte Auswertung bezüglich der Projektionsflächendefinitionen mit sich. Wird mit einem horizontiertem Instrument gescannt, erübrigt sich dieser Schritt. Die größte Bedeutung ist der Projektion im Grundriss beizumessen, denn diese geht als wichtigster Kronenparameter in viele Simulations- und Berechnungsmodelle mit ein.

5.8 3D-Rekonstruktion von Ästen

Die Aststruktur der Bäume ist baumarten- und altersspezifisch und stellt eine anspruchsvolle Aufgabe bei der Rekonstruktion dar. 3D-Baummodelle sind in Stadtmodellen, Computerspielen und virtuellen Realitäten kaum noch wegzudenken (Cheng et al., 2007). Zur realitätsnahen Darstellung der Bäume werden meist vorliegende 3D-Daten analysiert und zu einem Computermodell zusammengestellt. Baumgeneratoren auf Datenbankbasis ermöglichen eine schnelle und baumartenspezifische Wiedergabe von realitätsnahen Baummodellen.

Auch bei Waldbäumen ist die Kenntnis der Aststruktur von Interesse. Zum einen lässt sich die Biomasse des Astholzes zusätzlich zum Stammholz bestimmen und zum anderen ist eine verbesserte Blattflächenindexbestimmung anhand von kombinierten Bild- und Laserscannerdaten möglich. Die Topologie der Äste kann neben der Farbinformation aus den Bilddaten zur Klassifizierung der Phytoelemente (Blätter, Äste, Stamm) beitragen und somit den LAI präziser bestimmen. Zur Bewirtschaftung und Pflege von Straßenbäumen sowie zur Verkehrssicherheit sind Informationen über die Aststruktur ebenfalls nützlich. Analysen über die Ausdehnung und den Neigungswinkel der Äste lassen Prognosen kritischer Äste zu und dienen als Frühwarnsystem. Auch bei Obstbäumen spielt der Astneigungswinkel zur Ertragssteigerung eine entscheidende Rolle und wird durch Verfahren des Kronenschnittes beeinflusst (Dahlem et al., 2002).

Algorithmen wie *Shape from Silhouette* (Laurentini, 1994) ermöglichen aus mehreren konvergent aufgenommenen Kamerabildern die volumetrische Rekonstruktion der Ast- und Kronenstruktur (z. B. Shlyakhter et al., 2001; Vock et al., 2010). Über geeignete Bildverarbeitungsschritte werden zunächst die Kronenhüllen oder gar die Äste extrahiert und in den Objektraum rückprojiziert.

Unter Verwendung von unorganisierten terrestrischen 3D-Laserscannerpunktwolken werden Kronen und Äste rekonstruiert. Über Voxelräume oder Octreeansätze werden die Daten zunächst strukturiert und mit morphologischen Operationen gefiltert, bevor sie einer Skelettierung unterzogen werden (u. a. Gorte & Pfeifer, 2004; Pfeifer et al., 2004; Bucksch & Wageningen, 2006; Gorte, 2006; Bucksch et al., 2009a). Die meisten Ansätze verwenden zur Umsetzung der Skelettierung die Graphentheorie. Pfeifer et al. (2004) passen automatisch Zylinderelemente in den Stamm und in Bereiche dominanter Äste ein. Mit Hilfe einer 3D-Hough-Transformation führen Fleck et al. (2004) eine Skelettierung eines Apfelbaumes zur Erstellung eines 3D-Lichtmodells und zur Bewertung der physiologischen Leistungsfähigkeit durch. Bucksch et al. (2009b) skelettieren ALS-Daten, aufgenommen von einem Helikopter mit einer Punktdichte von 50 Pkte/m².

5.8.1 Algorithmus zur Astrekonstruktion

Der hier vorgestellte Algorithmus hat die Rekonstruktion der Hauptäste (Äste 1. und 2. Ordnung) zum Ziel. In einem ersten Schritt wird zunächst eine Filterung durchgeführt, die kleine Äste und Zweige mit Blattwerk von den Hauptästen trennt. Dabei wird die Baumpunktwolke in einen Voxelraum transformiert und die in einem Voxel befindliche Punktzahl gezählt. Die Voxelgröße ist in Abhängigkeit von der Objektausdehnung und der Scanauflösung zu wählen. Bereiche mit einer flächigen Ausdehnung, wie Stamm und große Äste, werden durch Voxel hoher Punktzahl repräsentiert. Kleine Zweige mit Blättern hingegen weisen eine geringe Punktzahl auf. Über die Punktzahl im Voxel wird eine Filterung durchgeführt, und nur die Voxel mit einer Punktzahl größer als ein Grenzwert werden im weiteren Verlauf betrachtet (Abbildung 5.32).

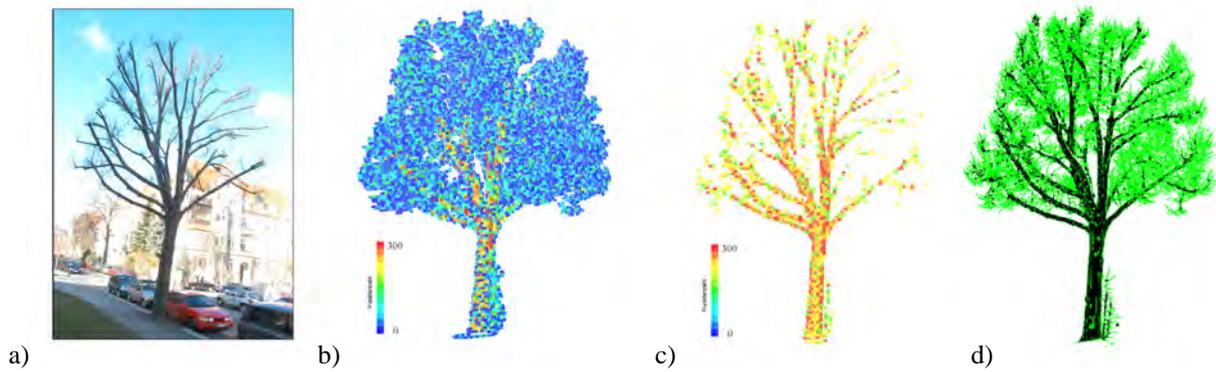


Abbildung 5.32: a) Testbaum; b) farbcodierter Voxelraum (10 cm) nach der Punktzahl; c) gefilterter Voxelraum; d) kombinierte Ansicht der Originalpunktwolke (grün) mit der gefilterten Punktwolke (schwarz).

Nach erfolgreicher Filterung wird die Punktwolke ab der detektierten Kronenansatzhöhe aufwärts in horizontale Schichten mit konstanter Höhe zerlegt. Auf die Punkte einer Schicht wird der 3D-Separierungsalgorithmus (Scheller, 2005) angewendet und zusammenhängende Punkte werden in Cluster eingeteilt. Bestenfalls repräsentiert ein Cluster einen Astabschnitt. Die Clusterpunkte wiederum werden dann einer Eigenwertberechnung unterzogen. Zunächst wird der Schwerpunkt $P_0 (X_0, Y_0, Z_0)$ aller Clusterpunkte n berechnet und die Matrix \mathbf{A} aufgestellt:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_1 - X_0 & Y_1 - Y_0 & Z_1 - Z_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n - X_0 & Y_n - Y_0 & Z_n - Z_0 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

Die symmetrische Matrix \mathbf{B} ergibt sich aus:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \quad (5.40)$$

Die Gleichung 5.41 beschreibt das Eigenwertproblem mit der Matrix \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} \mathbf{x}_k = \lambda_k \mathbf{x}_k \quad (5.41)$$

Über die Bestimmung der Eigenwerte λ_k werden die Eigenvektoren \mathbf{x}_k berechnet. Der Eigenvektor zum größten Eigenwert definiert die Hauptrichtung der Punkte im Cluster und somit den Näherungsverlauf der Äste (Abbildung 5.33 a).

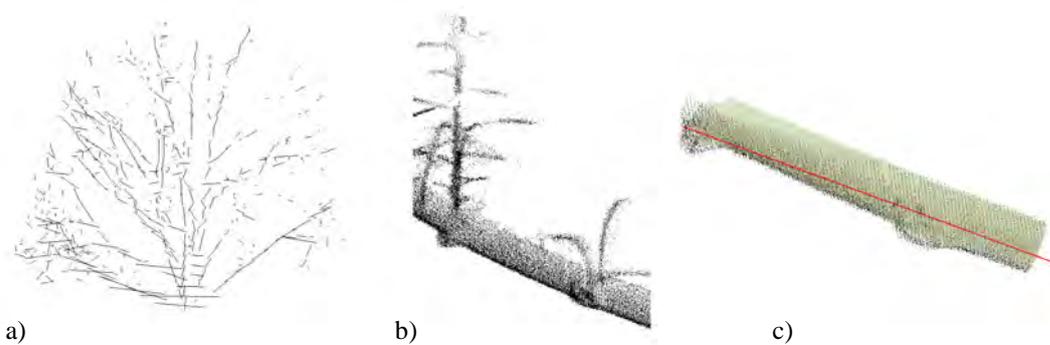


Abbildung 5.33: a) Eigenvektoren der Clusterpunkte; b) Stammabschnitt vor der Punktselektierung über die Abstandsbestimmung zum Eigenvektor; c) selektierte Punkte mit Eigenvektor und eingepassten Zylindern (Zylinderhöhe: 5 cm).

Im dritten Schritt werden die Eigenvektoren verwendet, um die Astpunkte auszuschneiden und über das Einpassen von Zylindern eine volumetrische Rekonstruktion des Astwerkes durchzuführen. Die Punkte in unmittelbarer Nachbarschaft eines jeden Eigenvektors, die vermutlichen Astpunkte, werden über die Berechnung des räumlichen Abstandes zum Eigenvektor selektiert. Die Punkte, deren Abstand zum Eigenvektor kleiner als ein zuvor definierter Grenzwert ist, werden in eine neue Punktliste geschrieben. Um einen Zylinder in einen schräg verlaufenden Astabschnitt einzupassen, werden die selektierten Punkte in ein aufrechtstehendes Koordinatensystem transformiert (der Eigenvektor repräsentiert die Z-Achse). Über die Bestimmung der Drehwinkel des projizierten Vektors in die XZ- und YZ-Ebene werden die Punkte durch zwei Rotationen aufrechtgestellt. Die transformierten Punkte werden dann in Schichten konstanter Höhe separiert und in jede Schicht wird ein Zylinder eingepasst. Anschließend werden die Punkte in das Ausgangssystem zurückrotiert.

Fehlerhafte Punkte, hervorgerufen von kleinen Zweigen, werden über den Ausreißertest im Zuge der Ausgleichung eliminiert. Dennoch stößt der Algorithmus an seine Grenzen. Ein krummliniger Astverlauf hat zur Folge, dass die Transformation bestimmter Bereiche aufgrund der Nutzung des Eigenvektors nicht ausreichend ist. Diese Punkte bilden in der Projektion keine Kreisform ab. Die Berechnung des ausgleichenden Kreises ist fehlerhaft oder führt gar nicht erst zu einer Lösung. Abhilfe schafft die Zerlegung der Stammabschnitte in kleinere Teile mit separaten Transformationen.

5.8.2 Skelettierung

Kleine Zweige haben einen Durchmesser von maximal 1-2 cm. Das Einpassen eines Zylinders würde hier aufgrund der Distanzmessgenauigkeit eines terrestrischen Laserscanners scheitern. Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, der aus kleinen Zweigen die Zweigstruktur über eine Skelettierung herstellt. Als erstes werden die Endpunkte des Zweiges detektiert. In jeden Laserscannerpunkt wird mittig ein 3D-Strukturelement der Größe s platziert, um die benachbarten Punkte zu selektieren. Anschließend wird für alle innerhalb des Strukturelementes befindlichen Punkte der eingeschlossene Winkel der Verbindungslinie zwischen dem aktuellen Punkt und dem entferntesten Punkt mit jedem weiteren Punkt berechnet (Abbildung 5.34). Dies geschieht jeweils in den Projektionen der XY-, XZ-, YZ-Ebenen. Sind alle berechneten Winkel kleiner als 90° , handelt es sich um einen Randpunkt. Wird ein stumpfer Winkel berechnet, ist dies ein Indiz für weitere Punkte im Zweigverlauf. Dieser Ansatz zur Bestimmung von 2D-Randpunkten eines Laserscannerschnittes wurde in Bienert (2008) vorgestellt. Ausgehend von den detektierten Randpunkten werden alle benachbarten Punkte innerhalb eines 3D-Strukturelementes selektiert und der Schwerpunkt sowie eine ausgleichende 3D-Raumgerade berechnet. Als neue Position für das Strukturelement wird der am entferntesten liegende Punkt auf der Raumgeraden verwendet. Das Strukturelement schiebt sich somit über die Laserscannerpunktwolke und speichert für jede Position einen Schwerpunkt ab.

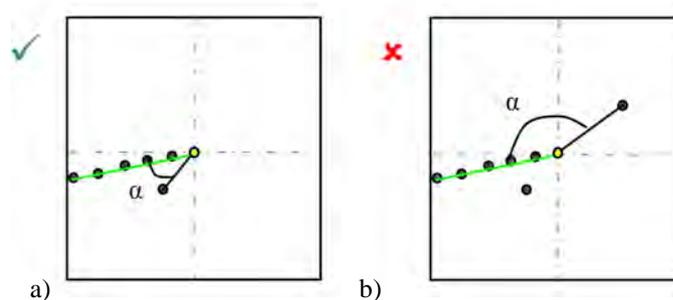


Abbildung 5.34: Randpunktbestimmung im Strukturelement der XY-Projektion: a) Randpunkt, wenn nur spitze Winkel vorhanden sind; b) kein Randpunkt, sobald ein stumpfer Winkel detektiert wird (Bienert, 2008).

Eine Möglichkeit, die Punkte zu vektorisieren, besteht in der Verbindung aller möglichen Punkte und in der Überprüfung der räumlichen Abstände der Laserscannerpunkte zur Verbindungslinie. Ist zum einen die Distanz zweier Schwerpunkte kleiner als eine maximal zulässige vektorisierte Linie und werden keine Lücken im Punktverlauf entlang

der vektorisierten Linie detektiert, wird die Punktombination als Linie gewertet (Bienert, 2008). Die Vektorisierung der Punkte in Abbildung 5.35 wurde hier allerdings manuell erstellt.

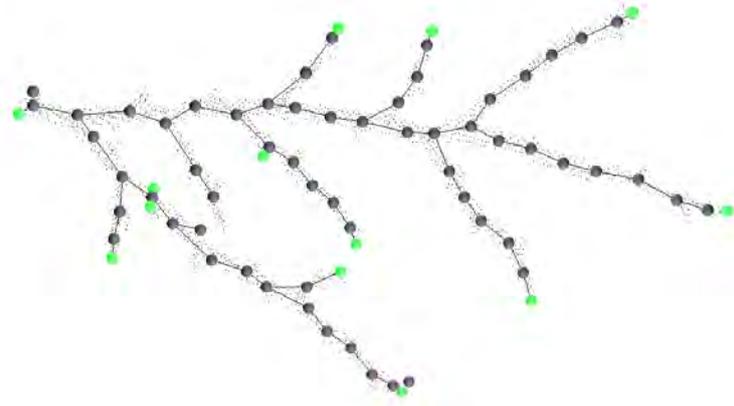


Abbildung 5.35: Manuell vektorisierter Buchenzweig mit automatisch detektierten Randpunkten (grün) und Schwerpunkten (schwarz).

5.9 Software-Paket *Autostem Forest*TM

Einige der vorgestellten Algorithmen zur Bestimmung der geometrischen Baumparameter sind u. a. Bestandteil des Software-Paketes *Autostem Forest*TM der irischen Firma TreeMetrics Ltd.. In Kooperation von TreeMetrics Ltd. mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Dresden ist ein Programm entstanden, das vollautomatisch aus 3D-Punktwolken terrestrischer Laserscanner geometrische Baumparameter ableitet. *Autostem Forest*TM ist vielseitig einsetzbar und findet Verwendung (TreeMetrics, 2010):

- bei der Forstinventur,
- zur Einschätzung des Holzwertes vor dem Verkauf,
- zur Optimierung der Holzernte,
- zum Wachstumsmonitoring und
- zur Messung von Kohlenstoffbindungen.

Mit der Entwicklung des Programmes wurde das Ziel eines optimierten Holzzuschnittes mit wenig Wertverlust verfolgt. Über die Kenntnis des Holzvorrates in verschiedenen Beständen wird die Planung der Ernte unterstützt und auf ein gezieltes Ernten in Beständen hingearbeitet. Der Zuschnitt der Stämme zu Brettern hängt von der Qualität, der Nachfrage und dem Wert der Bretter ab. Die Festlegung der Zuschnittparameter war bisher eine subjektive und somit kritische Entscheidung. Nicht selten führte ein ineffizientes Zuschneiden und die Verteilung an Sägewerke zu einer wertmindernden Nutzung von Holz und einhergehend damit zur Unzufriedenheit der Kunden. Mit dem Programm wird Händlern und Kunden des Holzmarktes die Möglichkeit eingeräumt, die Höhe des aktuellen Holzvorrats noch vor der Ernte zu bestimmen und damit den Wert, je nach Zuschnitt, kostenbringend zu schätzen und die Ernte im richtigen Stichprobengebiet zu starten (TreeMetrics, 2010).

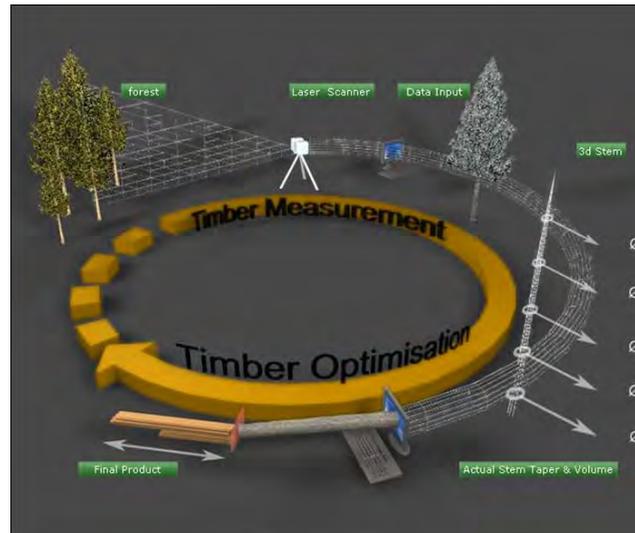


Abbildung 5.36: Prozesskette von der Aufnahme im Forst über die Datenprozessierung bis zur Ergebnisausgabe für den optimierten Holzzuschnitt (TreeMetrics, 2010).

Die Software ist in der Lage, das DGM, die Baumhöhen und -positionen, die BHD sowie weitere Durchmesser in konstantem Abstand entlang der Stammachse zu bestimmen. Unter Zuhilfenahme von Durchmessern hoher Genauigkeit wird in die Durchmessermitelpunkte ein Polynom eingepasst, das den Stammverlauf wiedergibt. Bereiche, bei denen eine Durchmesserbestimmung aufgrund von Verdeckungen nicht möglich ist bzw. eine sehr geringe Durchmesser Genauigkeit erreicht wird, werden durch die Polynomwerte ersetzt. Die Voraussage des Stammverlaufes über den letzten eingepassten Durchmesser hinaus ist über Ausbauchungsreihen unter Zuhilfenahme der Baumhöhe und des BHD ebenfalls möglich. Die ermittelten Durchmesser entlang des Stammes werden in *StanForD Stem File* ausgegeben. Dieses Harvester-spezifische Datenformat ermöglicht die Weiterverarbeitung der Durchmesserinformationen in Ernte-Optimierungsprogrammen (Keane, 2007). Die Ausgabe der Baumpositionen in ein georeferenziertes Koordinatensystem ist ebenfalls möglich.

Im Anhang A.3.1 ist eine Abbildung der Programmoberfläche von *Autostem ForestTM* dargestellt. Die Prozessierung geschieht über das Einlesen einer Punktwolke im Format $[X Y Z]$ und das Setzen externer Parameter durch den Nutzer. Zusätzlich sind im Programm weitere interne Parameter festgesetzt. Ein Workflow zu dem am IPF entwickelten Programm ist dem Anhang A.3.2 zu entnehmen. Zu den wichtigsten internen (*) und externen Parametern gehören:

- **Zuschnitt auf Plotradius:** innerer und äußerer Plotradius r_I und r_A
- **DGM-Generierung:** Rasterweite s_{Raster}^*
- **Baumdetektion:** Abstand der Punktwolkschicht über dem DGM $a_{Schicht}$, Schichthöhe $sh_{Detektion}$ der Punktwolkschicht, Mindestanzahl an Punkten n_{min}
- **Separierung der Bäume:** Zylinderradius r_{Zyl}^*
- **BHD-Bestimmung:** Mindestanzahl an Punkten n_{min} , Schichthöhe sh_{BHD} der selektierten Stammschicht
- **Profile entlang des Stammes:** Abstand a_{Profil} sowie die Schichthöhe der Profile sh_{Profil}
- das **Qualitätsmaß P_d** zur Durchmesserbestimmung
- weitere Parameter zur Berechnung des Stammverlaufes über Ausbauchungsreihen.

Die Ergebnisse der extrahierten Parameter werden in einer separaten Textdatei gespeichert. Zusätzlich werden VRML-Dateien ausgegeben, die eine visuelle Kontrolle der Parameter ermöglichen.

5.10 Fazit

Die Geometrieparameter eines Baumes können neben konventionellen Erfassungsmethoden auch aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken gewonnen werden. Die hohe Punktzahl bietet dabei das Potential für automatische Ableitungen mit dem Vorteil einer objektiven Parametergewinnung. Deshalb wurden Algorithmen entwickelt und vorgestellt, die nahezu alle wichtigen Baumparameter automatisch ableiten können. In der Entwicklung der Algorithmen ist ein entscheidender Beitrag für die Forstwirtschaft und Forstwissenschaft zu sehen. Neben den geometrischen Baumparametern sind Gütekriterien und Kronenparameter sowie die Asttopologie bestimmbar. Da in der Regel ausgleichende Verfahren zur Ableitung der einzelnen Parameter herangezogen werden, ist die Punktlagegenauigkeit eines Einzelpunktes weniger entscheidend. Erst durch die Fülle an Punkten werden bessere Genauigkeiten erreicht, die für den Einsatz im Forst ausreichend sind.

Die Prozessierungszeiten sind dabei abhängig von der Punktzahl (Scanauflösung) und der Anzahl der Bäume. Für einen Plot mit einem Radius von 15 m, 30 Bäumen und einer Scanauflösung von $0,06^\circ$ werden ca. drei Minuten Prozessierungszeit veranschlagt. Bei der Programmentwicklung stand die Rechenzeitoptimierung nicht primär im Vordergrund, so dass gegebenenfalls noch beträchtliche Rechenzeitverkürzungen erzielbar sein dürften. Sind viele Streupunkte in der Punktwolke vorhanden, ist eine vorherige Filterung erforderlich. Die Streupunkte bewirken u. a. bereits bei der Baumdetektion mit der Clustermethode ein großes zusammenhängendes Cluster anstatt mehrere Einzelobjekte. Generell sind die Algorithmen mit Single- und Multiple-Scan-Aufnahmen im Format $[X Y Z]$ durchführbar. Je mehr Standpunkte allerdings vorhanden sind, um so geringer ist der Einfluss der Verdeckung. Die Datenaufnahme im Wald ist von Bestand zu Bestand unterschiedlich und richtet sich neben der Vegetationsstruktur nach der Charakteristik des eingesetzten Laserscanners, dem Wetter (Wind) und den geforderten Ergebnissen.

6 Registrierung von Laserscannerdaten

Beim Scannen von großen Objekten sind in der Regel mehrere Standpunkte notwendig, um das Objekt flächendeckend aufzunehmen. Komplexe Objektformen produzieren Scanschatten, die durch eine geeignete Standpunktwahl und durch mehrmalige Scanneraufstellung reduziert werden können. Das Ziel der Registrierung ist die Überführung der verschiedenen Punktwolkensysteme in ein übergeordnetes Koordinatensystem, bspw. für Zwecke der Datenanalyse, der Modellierung und der Visualisierung der Gesamtpunktwolke.

Der folgende Abschnitt präsentiert Möglichkeiten der automatischen Scandatenregistrierung von Forstaufnahmen. Dabei werden Algorithmen vorgestellt, die mit künstlichen Verknüpfungspunkten und aus der Baumgeometrie abgeleiteten diskreten Punkten arbeiten. Die in Bienert & Maas (2009) vorgestellten Ansätze werden hier näher erläutert. Im zweiten Teil des Kapitels wird die Registrierung von terrestrischen Laserscannerdaten und Flugzeuglaserscannerdaten behandelt. Es wird eine Methode präsentiert, die unter Nutzung der abgeleiteten Baumpositionen, wie Baumkronenmittelpunkt aus den ALS-Daten und BHD-Mittelpunkten aus den TLS-Daten, eine Registrierung durchführt (Bienert et al., 2011). Ein Nebeneffekt ist dabei die Georeferenzierung der terrestrischen Laserscannerpunktwolken.

6.1 Terrestrische Scanaufnahmen

6.1.1 Registrierung über Verknüpfungspunkte

Der Registrierungsprozess in Forstbeständen geht einher mit Verdeckungen, hervorgerufen durch dichte Bodenvegetation und Bäume. Demnach ist die Anordnung der Verknüpfungspunkte durch die vorhandene Vegetation eingeschränkt. Eine zeitaufwendige Analyse des Sichtkontakts der Punkte zu den Scannerstandpunkten vor der Aufnahme gewährleistet eine spätere Zuordnung von mindestens drei Verknüpfungspunkten zu benachbarten Scanpositionen. Bei dichter Bodenvegetation hat es sich bewährt, die Verknüpfungspunkte an Teleskopstangen (Wezyk et al., 2007) oder an Bäumen zu befestigen. Dabei stellt die erste Variante eine temporäre Vermarkung dar. Die Befestigung an Bäumen ist eine Möglichkeit der dauerhaften Vermarkung, wenn auf der Probefläche mehrere zeitlich getrennte Aufnahmen geplant sind (z. B. für die Detektion saisonaler Veränderungen (Schilling et al., 2011a)). Wie in Abschnitt 2.2.2 bereits vorgestellt, gibt es je nach Scannerhersteller die unterschiedlichsten Variationen von Verknüpfungspunkten. Bei Aufnahmen im Forst sind 3D-Verknüpfungspunkte den 2D-Zielmarken vorzuziehen, da eine allseitige Sichtbarkeit auch bei komplett gegenläufigen Aufnahmerichtungen gewährleistet ist. Im Folgenden wird auf die manuelle Detektion und Zuordnung von Verknüpfungskugeln eingegangen. Eine Steigerung hinsichtlich der Objektivität ist die Automatisierung der Kugeldetektion und die richtige Zuordnung gleicher Kugelpaare in unterschiedlichen Scans. Eine Methode zur Automatisierung wird in Abschnitt 6.1.1.2 vorgestellt.

6.1.1.1 Manuelle Kugeldetektion

Eine Registrierungsmethode, bei der der Nutzer Einfluss auf das Geschehen hat, ist die Registrierung mit einer manuellen Identifizierung und Zuordnung. Die manuelle Zuordnung von Verknüpfungspunkten zweier Datensätze ist ein aufwendiger Prozess, dessen Erfolg und Effektivität von der fehlerfreien Zuordnung der Kugeln und der Datensatzkomplexität abhängt. Viele Softwarepakete zur Auswertung von 3D-Daten ermöglichen eine (semi-)automatische Registrierung der Daten. Die heutigen Steuersoftwares der Laserscanner sind in der Lage, neben der Registrierung die wichtigsten Punktauswertungen (Zuschneiden, Kolorieren, Visualisieren, Einpassen von geometrischen Formen und Exportieren) und das Datenmanagement der einzelnen Standpunkte durchzuführen (Lemmens, 2009b).

Eine Berechnung der Kugelmittelpunkte sowie eine manuelle Zuordnung der Verknüpfungskugeln in den Scans ist in der Steuersoftware *Faro Scene* (Version: 4.5.8.2) realisiert. Zunächst müssen die Kugeln von der Umgebung separiert werden. Dies geschieht im Intensitätsbild auf zwei Wegen. Zum einen klickt der Nutzer in die Kugel und zieht eine kreisförmige Markierung auf, die sich der Kugel anpasst. Alle Punkte innerhalb der Kreismarkierung werden selektiert. Eine zweite Variante ist eine automatische Objektmarkierung, bei der der Radius der Verknüpfungskugeln unterstützend

hinterlegt ist. Die Markierung erfolgt dann mit Hilfe interner Schwell- und Intensitätswerte. Bei dieser Variante kann es passieren, dass neben den tatsächlichen Kugelpunkten auch intensitätsstarke Unter- und Hintergrundpunkte mit markiert werden (siehe Abbildung 6.1). Der Mittelpunkt der Kugel wird in einer Kugelausgleichung bestimmt und definiert den Verknüpfungspunkt. Dabei hat der Nutzer die Wahl zwischen der Kugeleinpassung mit flexiblem Radius, d. h. der Radius wird in der Ausgleichung mitgeschätzt, und der Einpassung mit einem festen Radius. Da die verwendeten Kugeln einen bekannten Radius von 7,25 cm haben, wurde eine Kugelausgleichung mit festem Radius durchgeführt, um eventuelle Ausreißer anhand der Standardabweichung besser zu detektieren. Eine Analyse der gefitteten Kugel mit den 3D-Punkten hat gezeigt, dass die fehlerhaft markierten Hintergrundpunkte, die in der Selektion noch vorhanden waren, im Kugelfit-Algorithmus durch einen robusten Ausreißertest keinen Einfluss auf die berechnete Kugel haben.

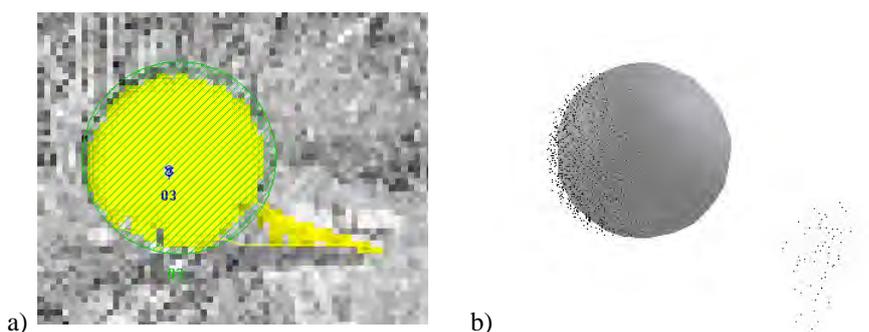


Abbildung 6.1: Manuell markierte Kugel mit „Objekt-Markierung“ in Faro Scene (a); selektierte 3D-Punktwolke mit eingepasster Kugel und Hintergrundpunkten (b).

6.1.1.2 Automatische Kugeldetektion

Da die zu detektierenden Kugeln einen bekannten Durchmesser und eine weiße, glatte Oberfläche haben, wurde ein Algorithmus entwickelt, der im Intensitätsbild eine automatische Kugeldetektion durchführt. Im Intensitätsbild (Abbildung 6.2 a) geben die Grauwerte der Pixel die Intensität der reflektierten Laserpulse wieder. Bereiche mit hoher Intensität werden sehr hell dargestellt. Zusätzlich zu diesen Informationen (Pixelkoordinaten mit dem jeweiligen Grauwert ($g_i = 0, \dots, 255$)) werden die 3D-Raumkoordinaten mit X , Y und Z im weiteren Verlauf benötigt. Prinzipiell ist der Algorithmus in drei Teile geteilt.

In einem ersten Schritt wird eine Schwellwertoperation durchgeführt mit dem Ziel, Bereiche sehr hoher Intensität im Bild zu belassen und Pixel mit niedriger Intensität auszublenden. Dazu wird ein Schwellwert festgesetzt. Intensitätsstarke Bereiche wie Teile von Baumstämmen, Bodenpunkte und Kugeln bleiben nach der Schwellwertoperation erhalten und werden auf den Wert 1 (weiß) gesetzt. Pixel mit kleineren Grauwerten (Hintergrund) erhalten den Wert 0 (schwarz) (Abbildung 6.2 b). Im Anschluss daran wird eine Bildinvertierung durchgeführt. Dieser Schritt ist optional und wird hier nur für eine bessere Darstellung der Zwischenergebnisse angewendet (Abbildung 6.2 c).

Aufgrund der weißen Kugeloberfläche erscheinen die Kugeln im Binärbild als zusammenhängende Pixel einer geschlossenen runden Fläche, die durch die Schwellwertoperation noch mit hellen Bereichen aus der Nachbarschaft verbunden sind. Des Weiteren sind noch große Stammbereiche im Binärbild enthalten, die durch eine morphologische Erosion beseitigt werden. Ein 3×3 Pixel großes Strukturelement prüft die Nachbarschaft des zentralen Pixels auf Zugehörigkeit. Dabei werden die verbliebenen Pixel mäanderförmig im Bild angefahren. Sobald eines der acht Nachbarpixel nicht belegt ist (Wert 1), wird das Mittelpixel gelöscht und der Wert auf 0 gesetzt.

Im dritten und letzten Schritt wird das erodierte Bild auf Cluster untersucht. Ein modifizierter 2D-Separierungsalgorithmus (Abschnitt 5.3.2.1.1) sucht mit einem Strukturelement S nach Punktclustern im Bild. Die Punkte werden einem Kugelfit unterzogen, wenn:

- eine Mindestpunktzahl n_{min} vorhanden ist,
- die 3D-Begrenzungsbox der Cluster eine bestimmte Größe nicht überschreitet und
- die Clusterpunkte im Binärbild als geschlossene Fläche ohne Lücken auftreten.

Beim Kugelfit fließt der Kugelradius als bekannter Parameter mit ein, sodass nur die Mittelpunktkoordinaten der Kugeln als Unbekannte hervorgehen. Nach Analyse des Verbesserungsvektors nach Ausreißern und deren Elimination finden iterativ weitere Anpassungen statt. Dies geschieht so lange, bis alle Elemente des Vektors kleiner als ein gesetzter Grenzwert sind. Eine Kugel ist erfolgreich detektiert, sobald die Standardabweichung der Ausgleichung $\hat{\sigma}_o$ kleiner als σ_{0max} ist.

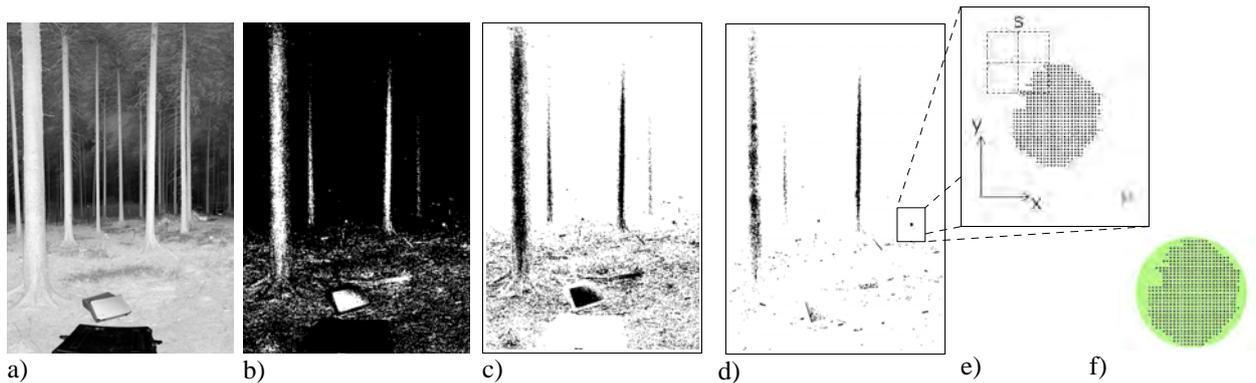


Abbildung 6.2: Ablauf der Kugeldetektion: a) Ausschnitt eines Intensitätsbildes; b) Binärbild (Schwellwertgefiltert); c) invertiertes Binärbild; d) erodiertes Binärbild; e) erodierter Pixelbereich mit Strukturelement zur Clustersuche; f) eingepasste Kugel.

Eine weitere Methode zur Detektion der Kugeln kann anstatt im 2D-Raum im 3D-Raum stattfinden. Die intensitätsgefilterten Punkte werden, in Analogie zur 2D-Kugelsuche, mit dem 3D-Separierungsalgorithmus in Punktcluster eingeteilt und Kugeln eingepasst. Dies ist allerdings rechenaufwendiger, da die 3D-Punkte ungeordnet in einer Liste vorliegen und nicht wie bei der Kugelsuche im 2D-Raum die Punkte über eine (Bild-)Matrix ansprechbar sind. Allerdings findet im 3D-Raum eine Separierung der Punkte nach ihrer tatsächlichen Lage statt, während bei der Clusterung im Binärbild nur die 2D-Nachbarn berücksichtigt werden, die zwangsläufig nicht räumlich nah beieinander liegen müssen. Zum Beispiel werden zwei Stämme, die leicht versetzt und in einem räumlichen Abstand zueinander stehen, aufgrund der Blickrichtung im Binärbild als ein Cluster erkannt, obwohl beide räumlich getrennte Objekte sind. Dies hat zur Folge, dass eine Kugel, die am Stamm angebracht war, im schlechtesten Fall nicht vom Stamm separiert werden kann und demnach auch nicht detektiert wird, da das Punktcluster eine zu große Begrenzungsbox besitzt oder Kugeln auf dem Boden nicht vom Boden trennbar sind. Abhilfe kann man zum einen schon während der Aufnahme im Bestand treffen, indem die Kugeln auf einen Untergrund geringer Intensität (Tuch, Kasten) platziert werden. Beim Platzieren der Kugeln an metallischen Reflektorstäben ist eine Manschette unterhalb der Kugel ebenfalls sehr nützlich. Zum anderen ist ein kombinierter 2D-3D-Algorithmus zielführend. Nachdem die Cluster im 2D-Raum separiert wurden, können diese einer zusätzlichen 3D-Separierung unterzogen werden, was weniger rechenintensiv ist, da die Punktzahl durch die erste Clusterung eingeschränkt wird und scheinbar zusammenhängende Objekte trennt.

6.1.1.3 Punktzuordnung

Nach erfolgreicher Detektion der Verknüpfungspunkte sind Punktkorrespondenzen Voraussetzung für eine erfolgreiche Registrierung. Wie in Abschnitt 2.3.1.1 bereits vorgestellt, gibt es eine Menge von Algorithmen, die eine automatisierte Zuordnung von Punkten im 2D- und 3D-Raum ermöglichen. Im Folgenden sollen die Verfahren des Distanz- und Winkelmusters sowie der Zuordnung mittels RANSAC näher erläutert werden. Mit C++-Routinen wurden die Verfahren in einem Registrierungsprogramm (Abschnitt 6.1.1.3.4), welches nach erfolgreicher Zuordnung eine Helmert-Transformation durchführt, umgesetzt.

6.1.1.3.1 Distanz- und Winkelmuster

Eine Grundvoraussetzung aller Zuordnungsverfahren ist die temporäre Stabilität der Verknüpfungspunkte. Ausgehend von dieser Tatsache werden bei der Methode der Distanz- und Winkelmuster Punktkorrespondenzen durch den Vergleich von Strecken oder Winkel gebildet. Die Distanz- oder Winkelkombinationen von Verknüpfungspunkten untereinander in einem Scan beschreiben ein Muster, welches es in anderen Scans im Rahmen einer vorgegebenen Toleranz eindeutig zu identifizieren gilt. Bei der Verwendung von 3D-Verknüpfungspunkten ist eine allseitige Sichtbarkeit gegeben, was u. a. die Bestimmung von Distanz- und Winkelmustern von diametralen Scanaufnahmen erlaubt. In einem ersten Schritt wird pro zu registrierende Scanaufnahme k eine Distanzkombinationsmatrix $\mathbf{D}_{n,n}^k$ (Gleichung 6.1) bestimmt. Die Dimension der symmetrischen Matrix \mathbf{D} ergibt sich aus der Anzahl der Verknüpfungspunkte n . Die Hauptdiagonale von \mathbf{D} ist mit Nullen besetzt, da diese die Streckenberechnung von einem Punkt mit sich selbst enthält.

$$\mathbf{D}_{i,j}^k = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \quad \text{mit } i, j [1..n], k [1,2] \tag{6.1}$$

Im Anschluss daran werden die Elemente von \mathbf{D} der beiden Scanaufnahmen zeilenweise verglichen, indem die Differenz gebildet wird. Die Elemente der Hauptdiagonalen werden außer Betracht gelassen. Für jede Differenz innerhalb einer zuvor definierten Toleranz t wird eine Zählvariable inkrementiert und zeilenweise in eine Homologiematrix \mathbf{H} geschrieben, deren Dimension sich aus den Zeilen der Distanzkombinationsmatrizen ergibt. Die Zellenindizes der Zelle mit der größten Übereinstimmung (Voraussetzung: Zählvariable ≥ 3) entsprechen dem homologen Punktpaar.

Für die Zuordnung mit Winkelmustern wird simultan vorgegangen. Das Winkelmuster hat gegenüber dem Distanzmuster den Vorteil, dass es neben der Rotations- und Translationsinvarianz auch skalierungsinvariant ist. Dies kommt bei den Laserscannerdaten aufgrund des einheitlichen Maßstabes nicht zum Tragen, ermöglicht aber gegebenenfalls auch eine Zuordnung von Punkten aus 3D-Daten unterschiedlichen Maßstabs.

In dem unten aufgeführten Beispiel ist ein Distanzmuster (Abbildung 6.3) für vier Verknüpfungspunkte zweier Scanstandpunkte gegeben.

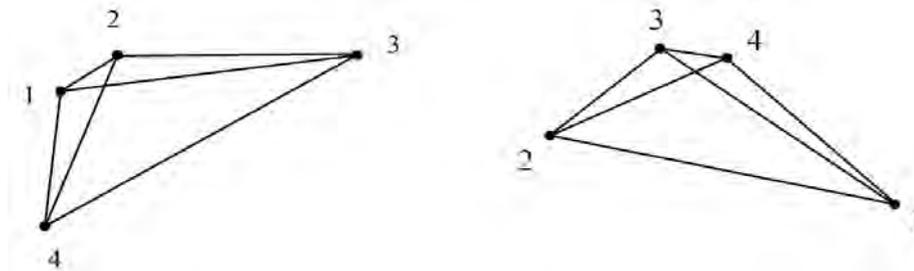


Abbildung 6.3: Distanzmuster zweier Scanaufnahmen am Beispiel von vier Verknüpfungspunkten.

Aus den Koordinaten der Verknüpfungspunkte lassen sich die Matrixelemente $\mathbf{D}_{i,j}^1$ und $\mathbf{D}_{i,j}^2$ mit Gleichung 6.1 berechnen:

$\mathbf{D}_{i,j}^1$ [m]		j			
		1	2	3	4
i	1	0,00	2,51	9,06	5,80
	2	2,51	0,00	7,14	7,57
	3	9,06	7,14	0,00	11,22
	4	5,80	7,57	11,22	0,00

$\mathbf{D}_{i,j}^2$ [m]		j			
		1	2	3	4
i	1	0,00	11,22	9,06	7,13
	2	11,22	0,00	5,79	7,58
	3	9,06	5,79	0,00	2,52
	4	7,13	7,58	2,52	0,00

Nach elementweisem und zeilenweisem Vergleich der Differenzen und unter Berücksichtigung der Differenztoleranz t_{max} erhält man die Homologiematrix \mathbf{H} mit den Punktkorrespondenzen:

\mathbf{H}		Zeile von D^2			
		1	2	3	4
Zeile von D^1	1	1	1	3	1
	2	1	1	1	3
	3	3	1	1	1
	4	1	3	1	1

Das dargestellte Beispiel ist der Idealfall, d. h. jedem Punkt aus Scan 1 wird ein homologer Punkt im zweiten Datensatz zugeordnet. In der Realität ist aber mit verdeckten und falsch detektierten Verknüpfungspunkten zu rechnen, was zur Folge hat, dass nicht jedem Punkt ein Partner zugewiesen werden kann. Symmetrische Punktanordnungen und gleiche Streckendifferenzen führen zu Mehrdeutigkeiten im Winkel- und Distanzmuster, die zu keiner Lösung führen.

6.1.1.3.2 RANSAC

Ein robusteres Verfahren gegenüber Ausreißern ist die Homologiebestimmung mittels RANSAC. Es lässt sich grob in eine Hypothese und eine Verifikation einteilen. Aus einer verrauschten Datenmenge N inklusive Ausreißern wird durch Bestimmung eines zufälligen, minimal benötigten Beobachtungssatzes n an Daten eine Schätzung durchgeführt und der Transformationsparameter p bestimmt. In einer anschließenden Verifikation werden die restlichen Daten durch Anwendung der Transformationsparameter $X_0(X,Y,Z)$, ω , φ , κ und gegebenenfalls m einer Analyse unterzogen. Dabei wird ein Zähler inkrementiert, sobald ein Datenpunkt aus N_2 (Istpunkte) innerhalb einer vorgegebenen Toleranz t_{max} eines Datenpunktes aus N_1 (Sollpunkte) liegt. Durch iteratives Vorgehen wird der Datensatz mit den meisten Übereinstimmungen als korrekte Lösung angesehen. Die einzelnen Schritte zur Ermittlung homologer Punkte in zwei Datensätzen N_1 und N_2 mittels RANSAC sind:

- 1) Aufstellen eines Modells $f(x)$
- 2) Bestimmung einer zufälligen minimalen Beobachtungsanzahl n_i ($n_i \geq N_i$; $i = 1,2$; i - Datensatz der Soll- und Istpunkte) zur Lösung des Modells
- 3) Bestimmung der Transformationsparameter $X_0(X,Y,Z)$, ω , φ , κ , m mit n_i
- 4) Bestimmung von \bar{N}_2 durch Anwendung der Transformationsparameter auf den Datensatz N_2
- 5) Analyse aller räumlichen Distanzen s zwischen N_1 und \bar{N}_2 , wenn $s < t_{max}$ ist, dann Zähler inkrementieren und als homologes Punktpaar vormerken
- 6) Wiederholung der Schritte 2-5, bis maximale Anzahl an Iteration oder Abbruchkriterien erreicht sind
- 7) Die Punktconstellation mit dem maximalen Zähler sowie die Punkte, die zum Inkrementieren des Zählers geführt haben, werden zur Transformation verwendet.

Dabei wurde Schritt 7 insoweit angepasst, dass nur die Punkte aus Schritt 5 verwendet werden, die die Bedingung $s < t_{max}/2$ erfüllen.

RANSAC erlaubt eine Vorabschätzung der notwendigen Anzahl von Iterationen n_{iter} die zu einer erfolgreichen Zuordnungskonstellation mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit führt (Gleichung 6.2). Zusätzlich fließt das Wissen über die Zuverlässigkeit der automatischen Detektion sowie Zuordnung mit in die Berechnung von n_{iter} ein:

$$n_{iter} = \frac{\log(1-p)}{\log(1-w^n)} \quad (6.2)$$

mit p ... Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine zufällig ausgewählte Beobachtung korrekt ist,

w ... Wahrscheinlichkeit, dass die Beobachtung $s < t_{max}$ erfüllt ist,

n ... minimale Beobachtungsanzahl zur Bestimmung der Modellparameter.

6.1.1.3.3 Vergleich der Zuordnungsverfahren

Die Anwendung des Distanzmusters liefert bei einer überschaubaren Menge an Punkten, wie sie bei der Registrierung von TLS-Datensätzen verwendet werden, sehr gute Ergebnisse. Die Anzahl der zu berechnenden Distanzkombinationen steigt quadratisch mit der Anzahl der Verknüpfungspunkte. Ein robusteres Verfahren stellt allerdings das RANSAC dar, da iterativ das richtige Ergebnis über drei Punkte zunächst grob und dann fein angepasst wird. Durch Anwendung der Transformationsparameter auf die Daten findet simultan eine Kontrolle der Parameter statt, was bei dem Distanzmuster nicht der Fall ist. Dort wird die Homologie nach gleichen Strecken (bzw. Winkeln) ausgerichtet, was bei einer ähnlichen Streckenkombination zu einer falschen Zuordnung und somit zu einer falschen Transformation führt. RANSAC ist eine Methode, die selbst bei großen Punktmengen erfolgreiche Zuordnungen generiert, wie in Abschnitt 6.2.3 gezeigt wird.

6.1.1.3.4 Implementierung

Die in Abschnitt 6.1.1.3 vorgestellten Zuordnungsverfahren wurden mit C++ in einem Programm umgesetzt. Dieses Programm ermöglicht die Zuordnung homologer Punkte aus zwei verschiedenen Datensätzen und führt bei erfolgreicher Punktzuordnung eine Helmert-Transformation durch.

Die Benutzeroberfläche ist in zwei Registerkarten aufgeteilt. Auf der vorderen Registerkarte erfolgt nach Wahl des Zuordnungsverfahrens eine automatische Zuordnung und anschließende Transformation der Daten. Zunächst wird der Pfad zu den extrahierten Verknüpfungspunkten, die im Format [*Nr Gewicht X Y Z*] im Soll- und Istsistem vorliegen müssen, angegeben. Optional kann eine weitere Datei angegeben werden, die im Zuge der ersten Berechnung die in ihr enthaltenen Punkte transformiert. Folgende Zuordnungsverfahren sind möglich:

- über Punktnummern
- mit RANSAC mit Angabe der Iterationsschritte und einer Toleranz im 2D- oder 3D-Abstand
- über ein Distanzmuster mit Angabe der Mindestpunktanzahl und der maximalen Streckentoleranz
- über ein Winkelmuster mit Angabe der Mindestpunktanzahl und der maximalen Winkeltoleranz.

Die Schätzung des Maßstabes bei der anschließenden Helmert-Transformation ist ebenfalls optional und kann gegebenenfalls auf den Wert 1 festgesetzt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit der Ausgabe der Residuen zur visuellen Kontrolle. Nach erfolgreicher Zuordnung mit Helmert-Transformation werden die Parameter in der Programmoberfläche angezeigt und zusätzlich in einer Parameterdatei im Ordner der Solldatei abgespeichert. Der Helmert-Transformation liegt eine vermittelnde Ausgleichung zu Grunde, die eine Gewichtung der Verknüpfungspunkte ermöglicht. Ein farbiges Fenster neben der Standardabweichung zeigt über ein Ampelsystem die Güte der Transformationsparameter an. Dabei richtet sich die Farbe nach der Standardabweichung $\hat{\sigma}_o$, z. B.:

- grün: $\hat{\sigma}_o \leq 0,025$ m
- gelb: $0,025 \text{ m} < \hat{\sigma}_o \leq 0,30$ m
- rot: $\hat{\sigma}_o > 0,30$ m.

Die zweite Registerkarte „Transformation“ ermöglicht eine 7- bzw. 6-Parameter-Transformation. Die Rotation wird über die Angabe der drei Winkel oder die Rotationsmatrix eingelesen. Abbildung 6.4 zeigt die beiden Registerkarten.

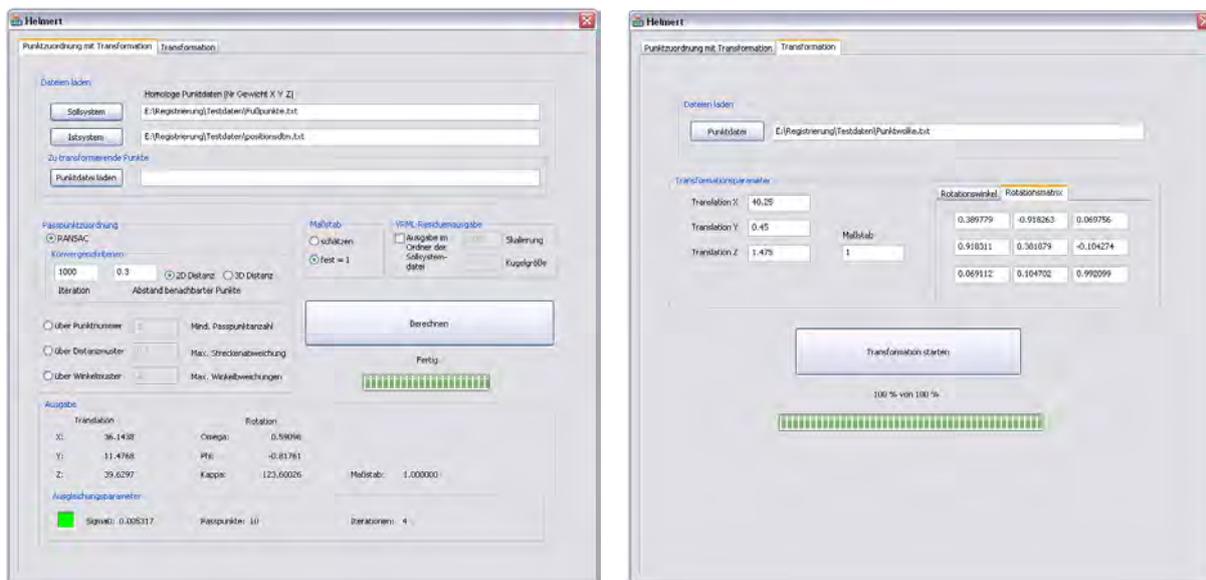


Abbildung 6.4: Programmoberfläche mit den Registerkarten „Punktzuordnung mit Transformation“ und „Transformation“.

6.1.2 Registrierung über Stammpositionen

Die Anbringung von Verknüpfungspunkten ist ein sehr zeitaufwendiger Prozess. Bäume und Bodenvegetation können trotz vorheriger Sichtbarkeitsanalyse zu Verdeckungen führen, die schlimmstenfalls ein Scheitern der Registrierung nach sich zieht. Eine Alternative ist die Verwendung natürlicher, im Wald vorhandener Verknüpfungspunkte. Da markante Punkte im Wald schwer zu definieren sind, wird im Folgenden eine Methode vorgestellt, die anhand extrahierter Brusthöhendurchmesser und Stammpositionen die Datenregistrierung durchführt. Laut Definition liegt der BHD am Stamm in 1,3 m über dem Gelände und ist somit mit seinem Mittelpunkt als ein eindeutig zu identifizierender Punkt am Stamm vorgegeben.

Der Stamm beschreibt idealisiert einen langgestreckten Kegelstumpf. Die Extraktion von Stammdurchmessern in beliebigen Höhen, durch Einpassen ausgleichender Kreisfunktionen in Punktwolkschichten, wurde in Abschnitt 5.4.3.1 präsentiert. Da für die Berechnung der Durchmesser mit den Mittelpunkten ein Stammprofil von maximal 10 cm Höhe verwendet wird, ist die Verjüngung auf dieser im Verhältnis zum kompletten Stammabschnitt vergleichsweise geringen Profilhöhe zu vernachlässigen. Wird nun von verschiedenen Seiten des Baumes ein Scan aufgenommen, so wird, ausgehend vom Baumfußpunkt, in 1,3 m Höhe am Stamm der Brusthöhendurchmesser in einer Punktwolkschicht mit einem ausgleichenden Kreis bestimmt. Bis auf kleine Abweichungen, hervorgerufen durch asymmetrische Stammformen, stimmen die extrahierten Durchmesser und deren Mittelpunkte von unterschiedlichen Blickrichtungen weitestgehend überein. Durch Bestimmung des Baumfußpunktes in Abhängigkeit von der angrenzenden Geländeneigung wird eine einheitliche Bezugshöhe für die BHD-Ableitung von unterschiedlichen Scannerstandpunkten aus vorgegeben. Das heißt, die Bestimmung eines BHD von zwei entgegengesetzten Standpunkten erfolgt, selbst in geneigtem Gelände, immer auf der gleichen Höhe des Stammes. Aufgrund der rotationssymmetrischen Form des Stammes ist eine allseitige Sichtbarkeit gegeben. Betrachtet man die Mittelpunkte der extrahierten Brusthöhendurchmesser als Verknüpfungspunkte, ist über die Bestimmung der Homologie wie in Abschnitt 6.1.1.3 z. B. mittels RANSAC eine Registrierung der Datensätze möglich. Das Ergebnis ist abhängig von der Dichte des Bestandes und der Bodenvegetation (teilweise Verdeckungen), von der Baumart und von den vorliegenden Stamminhomogenitäten (Beulen, Hohlkehlen), die den Prozess der Durchmesserbestimmung beeinflussen und somit direkt einen Einfluss auf die Lage der Kreismittelpunkte haben. Dennoch stellt diese Variante eine Grobregistrierung dar, die ohne künstliche VP auskommt.

6.1.3 Registrierung über Baumachsen

Eine weitere Möglichkeit ist die Registrierung unter Verwendung von Stammachsen. Die Stammachsen alleine ermöglichen eine lagerichtige Ausrichtung, die in Richtung der Stammachsen verschoben sein können. Um dies zu umgehen, benötigt dieses Verfahren neben den extrahierten mittleren Baumachsen einen korrespondierenden VP mit Höheninformation, um die Registrierung zu stabilisieren. Aus den Baumachsen und dem Verknüpfungspunkt werden Ebenen aufgespannt, die virtuelle Verknüpfungspunkte generieren.

Zunächst wird für jeden Stamm eine ausgleichende Stammachse g_{BA} bestimmt (Abbildung 6.5 a). Dies geschieht auf Grundlage der extrahierten Stammdurchmesser im konstanten Abstand entlang des Stammes. Dabei werden nur Profile des unteren Stammabschnittes betrachtet, da dieser in der Regel lückenlos erfasst wird und der Einfluss von Verdeckungen durch die Baumkrone oder gar von Bewegungen durch Windböen sehr gering sind. Eine Filterung der Punktwolke wird vorangestellt, wenn der untere Stammabschnitt Äste ausgebildet hat. Über die Anwendung von Eigensystemen ergibt sich aus den Mittelpunkten der unteren Stammprofile die mittlere Baumachse, die durch den Eigenvektor des größten Eigenwertes der Matrix \mathbf{B} repräsentiert wird und durch den Mittelpunkt $P_M (X_M, Y_M, Z_M)$ verläuft.

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \quad (6.3)$$

$$\text{mit } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_i - X_M & Y_i - Y_M & Z_i - Z_M \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n - X_M & Y_n - Y_M & Z_n - Z_M \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

In einem zweiten Schritt wird zunächst der Lotfußpunkt L_i einer zur Baumachse g_{BAi} orthogonal verlaufenden Geraden g_{VP} durch den Verknüpfungspunkt P_{VP} bestimmt. Mit dem Richtungsvektor \mathbf{x}_i der Baumachse i und dem Richtungsvektor $\mathbf{P}_{VP}\mathbf{L}_i$ wird über das Vektorprodukt eine Ebene Σ_i aufgespannt.

$$\Sigma_i = \mathbf{x}_i \times \mathbf{P}_{VP}\mathbf{L}_i \quad (6.5)$$

Die Längen der Normalenvektoren \mathbf{n}_i werden korrigiert auf den kürzesten Abstand vom Verknüpfungspunkt P_{VP} zur Baumachse g_{BAi} , was der Länge des Lotes l_i von P_{VP} zu L_i entspricht.

$$l_i = \sqrt{(X_{VP} - X_{L_i})^2 + (Y_{VP} - Y_{L_i})^2 + (Z_{VP} - Z_{L_i})^2} \quad (6.6)$$

Im Anschluss werden die korrigierten Normalenvektoren \mathbf{n}_i der Ebene in den Verknüpfungspunkt verschoben. Die Endpunkte der in P_{VP} befindlichen Normalenvektoren definieren neue virtuelle Punkte $P_{virtuell,i}$ (Abbildung 6.5 b). Über Zuordnungsverfahren werden homologe Partner des zweiten Datensatzes den virtuellen Punkten automatisch zugeordnet. Die Ausrichtung der Bäume gibt die Ausrichtung der Ebenen an und somit auch den Normalenvektor. Bei gerade und senkrecht gewachsenen Bäumen liegen die virtuellen Punkte alle verteilt in einer Ebene. Die Verteilung der Punkte innerhalb der Ebene hängt vom Baumabstand und vom Winkel der Bäume zum VP ab. Da sich die Lage der Bäume zu VP von zwei verschiedenen Scanpositionen aus nicht ändert, ist somit die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Registrierung gegeben. Dieses zeitsparende Verfahren unter Verwendung von nur einem VP ist zur Grobregistrierung gut geeignet.

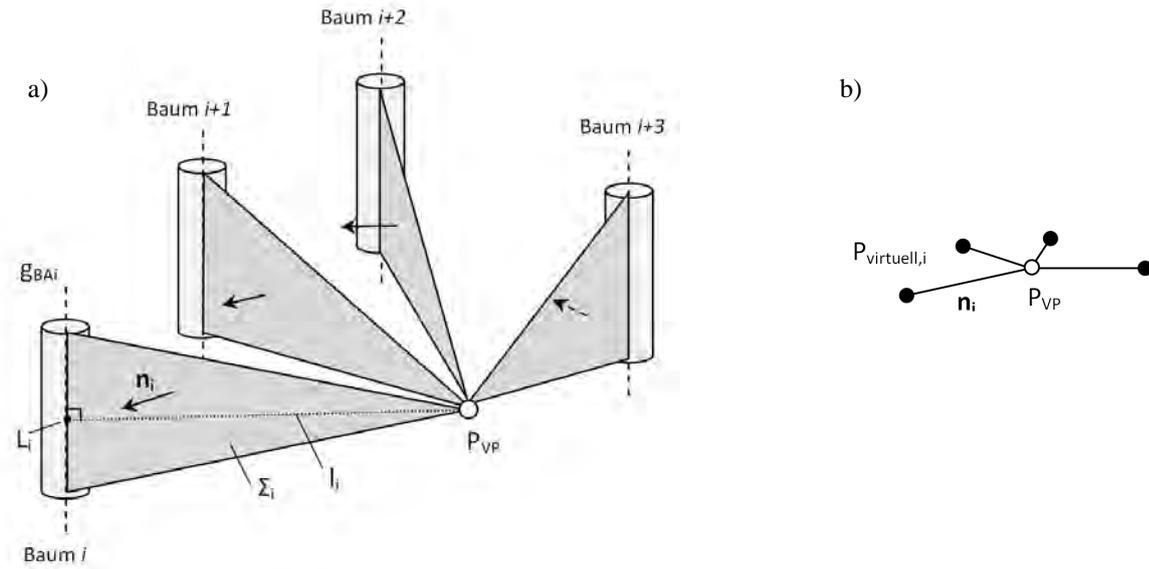


Abbildung 6.5: a) Prinzip der Bestimmung von virtuellen Verknüpfungspunkten $P_{virtuell,i}$ am Beispiel von vier Bäumen; b) Vier virtuelle Verknüpfungspunkte $P_{virtuell,i}$ mit einem Abstand l_i vom Verknüpfungspunkt P_{VP} .

Eine Verbesserung hinsichtlich der Grobregistrierung wird durch horizontalisierte Laserscanner erreicht. Die meisten Instrumente verfügen über Horizontiervorrichtungen, wie Dosen- und Röhrenlibelle und integrierte Neigungsmesser. Eine Korrektur hinsichtlich der Schiefstellung des Laserscanners setzt die Drehwinkel ω und φ um die X- und Y-Achse auf 0° fest. Ist diese Aufnahmevoraussetzung gegeben, lässt sich das Registrierungsverfahren in einer abgewandelten Form anwenden. Die Ebenen werden hierbei durch einen Punkt P_{MP} auf der mittleren Baumachse in einer definierten Höhe h über dem Baumfußpunkt und einer zum Koordinatensystem lotrechten Geraden durch den VP aufgespannt (Abbildung 6.6). Dieses Variante liefert eine bessere Registrierungs Genauigkeit, da zum einen eine Vororientierung vorgegeben ist und ω und φ als feste Werte eingehen und zum anderen die Abweichungen vom geradlinigen Stammverlauf einen geringeren Einfluss haben. Dabei sind durchaus hohe Registrierungs genauigkeiten zu erreichen.

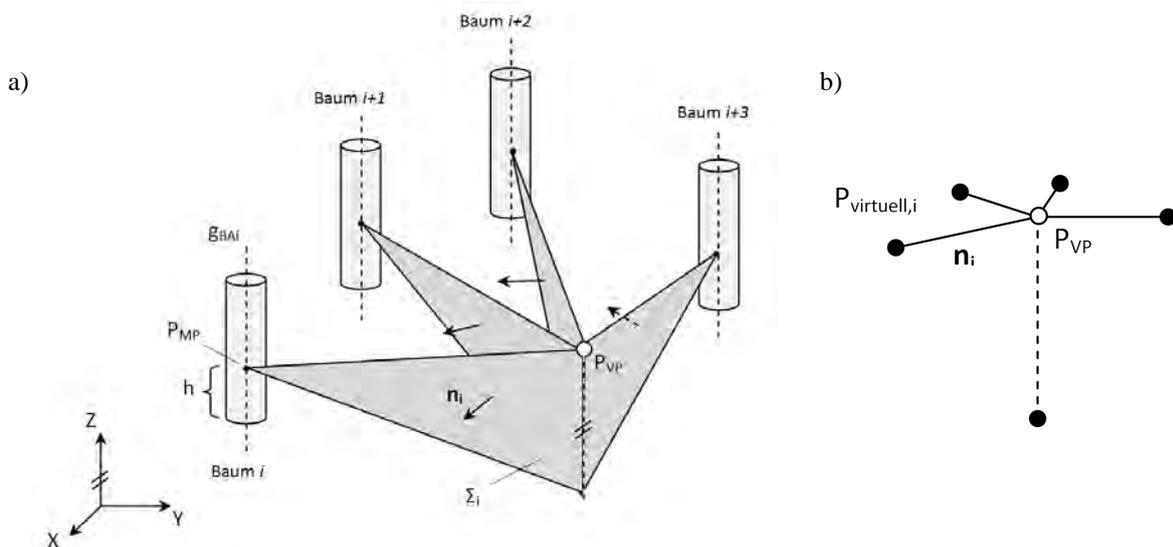


Abbildung 6.6: a) Prinzip der Bestimmung von virtuellen Verknüpfungspunkten $P_{virtuell,i}$ am Beispiel von vier Bäumen und mit horizontalisiertem Laserscanner; b) Vier virtuelle Verknüpfungspunkte $P_{virtuell,i}$ mit einem Abstand l_i vom Verknüpfungspunkt P_{VP} .

6.1.4 Registrierung über ICP

Eine Registrierungsmethode auf alleiniger Grundlage der Punktwolken ohne diskrete Verknüpfungspunkte ist die Ausrichtung über den ICP-Algorithmus. Die Grundvoraussetzung für dieses Verfahren ist eine gute Näherungsausrichtung der Punktwolken. Dieses Verfahren wird zur Feinregistrierung der grobregistrierten Punktwolken auf Basis der BHD-registrierten Daten eingesetzt. Zunächst wird eine Reduzierung der Punktwolke auf ausgewählte Bereiche vorgenommen und somit die Rechenzeit verkürzt und das Transformationsergebnis optimiert. Da eine Minimierung der Quadrate der Abstände der beiden Scandatensätze durchgeführt wird, werden im ICP-Algorithmus nur Stammbereiche verwendet, die sich ausreichend überlappen.

Um eine optimale Feinregistrierung zu erreichen, werden horizontale Schnitte in verschiedenen Höhen in den zu registrierenden Datensätzen extrahiert. Diese Schnitte enthalten bestenfalls einseitig aufgenommene Stammsegmente (Abbildung 6.7). In jedem Schnitt werden durch Anwendung des 2D-Separierungsalgorithmus Punktcluster einer bestimmten Größe separiert. Im Anschluss daran werden in beiden Datensätzen die Punktcluster gleicher Höhen auf Homologie untersucht. Findet sich zu einem Clusterschwerpunkt kein weiterer Schwerpunkt aus dem zweiten Datensatz, der eine bestimmte Distanz s_{min} unterschreitet, werden die Clusterpunkte gelöscht. Dieser Schritt ist essentiell, da aufgrund von Verdeckungen Stammabschnitte existieren, die keinen homologen Partner im zweiten Datensatz haben. Diese Punkte sind für den ICP-Algorithmus nicht geeignet und werden von dem Prozess ausgeschlossen. Zur erfolgreichen Ausrichtung benötigt der ICP-Algorithmus einen Überlappungsbereich der Daten. Demnach sind Stämme, die von zwei gegenläufigen Scanrichtungen (Abbildung 6.7 b) erfasst wurden, für das Verfahren nicht geeignet. Unter Beachtung eines maximal zulässigen Konvergenzwinkels beider Scannerstandpunkte zu jedem Baum (Clusterschwerpunkt) werden alle Stammsegmente extrahiert, die einen genügend großen Überlappungsbereich (Abbildung 6.7 a) am Stamm haben.

Vorhandene Äste begünstigen die Ausrichtung der Datensätze, da ohne Äste eine Verdrehung um die Stammachse möglich ist. Werden allerdings mehrere über den Schnitt verteilte Stammsegmente verwendet, ist eine Verdrehung um die Z-Achse ausgeschlossen. Letztendlich bilden die übriggebliebenen Cluster die Datengrundlage für den ICP-Algorithmus. Während die Punktwolke, die das Koordinatensystem der registrierten Daten vorgibt, den Referenzdatensatz (Modell) darstellt, ist die zweite Punktwolke der Datensatz, der durch Minimierung der Summe der Quadrate der Abstände zum Referenzdatensatz räumlich verändert wird⁹.

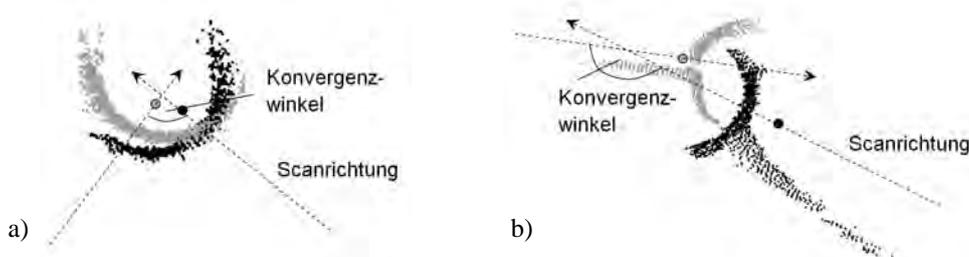


Abbildung 6.7: Stammsegmente zur ICP-Ausrichtung mit eingezeichneten Schwerpunkten und der Scanrichtung durch den Schwerpunkt; a) Stammsegmente mit einem Überlappungsbereich und einem günstigen Konvergenzwinkel; b) Stammsegmente zweier gegenläufiger Scanaufnahmen mit zu großem Konvergenzwinkel und ohne Überlappungsbereich.

6.1.5 Diskussion

Die vorgestellten Methoden ermöglichen eine Registrierung von TLS-Daten, die grundlegend in drei Schritte eingeteilt wird: in die Extraktion der Verknüpfungspunkte (künstlich, natürlich), die Zuordnung homologer Daten und die eigentliche Transformation. Die manuelle Kugeldetektion und Zuordnung ist ein aufwendiger Prozess, der gerade in Forstdatensätzen aufgrund der Unübersichtlichkeit und der schwer visuell interpretierbaren Punktwolke erschwert wird.

⁹ Für die Datensätze, die mit der Methode in Abschnitt 7.2 registriert wurden, wurde die ICP-Matlabroutine (Version 1.4) von Per Bergström verwendet.

Eine robuste Alternative ist die automatische Detektion und Zuordnung der Verknüpfungspunkte. Bei einer überschaubaren Menge an Punkten liefern die vorgestellten Verfahren sehr gute Ergebnisse, die trotz Fehler 1. und 2. Art zu einer erfolgreichen Registrierung führen. Da die Distanzkombinationen mit dem Quadrat der Punktzahl zunehmen, ist bei einer großen Anzahl an Punkten (natürlich oder künstlich) das RANSAC dem Distanzmuster vorzuziehen.

Generell ist zu klären, für welche Zwecke die Registrierung erfolgen soll. Ist eine gemeinsame Datenauswertung zur Ableitung von forstinventurrelevanten Baumparametern vorgesehen, sollte die Registrierung mit künstlichen Verknüpfungspunkten durchgeführt werden. Für räumliche Zuordnungen von Bäumen zur Bestimmung des Biomassezuwachses von zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen unterschiedlicher Jahre ist jedoch eine Grobregistrierung über Stammpositionen oder Baumachsen ausreichend. Die Ergebnisse der Registrierungsverfahren anhand zweier Aufnahmen des Fichtenbestandes im Tharandter Wald werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

6.2 Registrierung zwischen terrestrischen Laserscannerdaten und Flugzeuglaserscannerdaten

6.2.1 Motivation

Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmeplattformen unterscheiden sich ALS- und TLS-Daten u. a. hinsichtlich der Auflösung, der Ausdehnung des Aufnahmegebietes und der Aufnahmerichtung. Während flugzeuggetragene Laserscanner große Waldbestände innerhalb kurzer Zeit aufnehmen, beschränken sich terrestrische Laserscannerinstrumente auf vergleichsweise kleine Gebiete. Dies liegt zum einen hauptsächlich an der geringeren Reichweite des Entfernungsmessers der meisten terrestrischen Laserscanner und zum anderen an der Abschattung des Signals durch die Vegetation. Dies macht sich auch in der Punktdichte bemerkbar: Während flugzeuggestützte Laserscannerdaten ca. 0,5 ... 30 Punkte pro Quadratmeter (Pkt/m²) (je nach System, Flughöhe und Geschwindigkeit) aufweisen (Beraldin et al., 2010), verfügen terrestrische Punktwolken über mehrere Tausend Pkt/m². Aufgrund dieser Unterschiede ergeben sich unterschiedliche Auswerteverfahren und ableitbare Informationen. Eine Hauptanwendung des ALS im Forst ist die Ableitung von Topographiedaten in Form von Oberflächenmodellen. Die TLS-Daten bieten, wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, Potential zur Ableitung von forstinventurrelevanten Baumparametern.

Die Registrierung beider Datensätze (TLS und ALS) hat den Vorteil der komplementären Nutzung beider Aufnahmeplattformen. Flugzeuglaserscannerdaten komplettieren die Kronen, die von bodennahen Scanpositionen aufgrund von Abschattungen schlecht erfasst werden. Beispielsweise ergänzen die TLS-Daten mit Informationen der Ast- und Stammdaten die ALS-Daten. Ein weiterer Aspekt ist die Georeferenzierung der terrestrischen Laserscannerdaten, die mit der Registrierung einhergeht, da der Prozess der Georeferenzierung von TLS-Daten im Wald aufgrund von u. a. Abschattungseffekten problematisch ist. Aufgrund der unterschiedlichen Dateneigenschaften (Blickrichtung, Punktdichte) beider Aufnahmeplattformen ist eine Registrierung über homologe Punkte in der Punktwolke von Waldgebieten unmöglich. Markante, eindeutig zuordenbare Punkte, wie sie in Stadtgebieten durchaus vorhanden sind (z. B. Dachkanten, Dachfirste), fehlen gänzlich in Forstdatensätzen aus ALS und TLS.

Unter Verwendung extrahierter markanter Baumpunkte (Baumspitze, Baumfußpunkt) wird im Folgenden ein Ansatz präsentiert, der über eine Grob- und eine Feinregistrierung die Daten zueinander registriert. Abbildung 6.8 zeigt den prinzipiellen Ablauf zur Registrierung der ALS- und TLS-Daten. Weitere Erläuterungen sind in Pech (2010) und Bienert et al. (2011) zu finden.

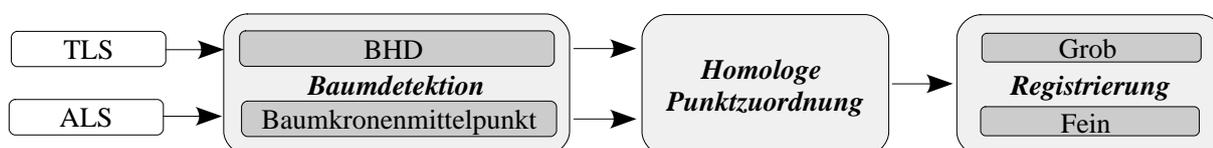


Abbildung 6.8: Ablauf zur Registrierung von ALS- und TLS-Daten.

6.2.2 Baumdetektion in ALS-Daten

Aufgrund der unterschiedlichen Blickrichtung der Aufnahmesysteme und der daraus resultierenden Punktdichte werden die Baumpositionen in den Daten unterschiedlich definiert. In den TLS-Daten werden die Baumpositionen anhand des BHD und in den ALS-Daten anhand der lokalen Maxima im Kronenmodell bestimmt. In den TLS-Daten werden die Bäume in mehreren horizontalen Schichten extrahiert. In den Schichten werden Punktcluster lokalisiert, analysiert und nach bestimmten Gesichtspunkten klassifiziert. Diese Methode wurde in Abschnitt 5.3 vorgestellt.

Der Schwerpunkt in diesem Abschnitt wird vielmehr auf die Bestimmung der Baumpositionen aus den ALS-Daten gelegt. In Abschnitt 1.2.2.2 wurden bereits Veröffentlichungen angeführt, die sich mit der Ableitung von Baumpositionen aus ALS-Daten beschäftigen. Anhand der vorliegenden Daten wurden zwei Methoden umgesetzt und getestet, deren Ergebnisse in Abschnitt 7.3 präsentiert werden. Grundsätzlich werden die Bäume aus den lokalen Maxima im normierten Kronenmodell detektiert (siehe auch Hyypä et al. (2001)). Die Normierung im Kronenmodell hat den Vorteil, dass Sträucher von vornherein ausgeschlossen werden und nur Bäume der oberen Bestandsschicht im Fokus stehen. Je nach Punktdichte wird die Krone durch mehrere Punkte repräsentiert, bei denen der höchste Punkt idealerweise die Baumspitze beschreibt. Frühere Literaturquellen zeigen, dass bei einer solchen Vorgehensweise neben den richtigen Baumstandorten auch fehlerhaft detektierte Baumpositionen zu erwarten sind. Daher ist das Ziel der Methode mehr auf die Richtigkeit der Baumpositionen ausgerichtet als auf die Vollständigkeit der Erfassung der Baumkronen.

6.2.2.1 Wasserscheidentransformation

Zur Abgrenzung der Bäume auf Basis des Kronenmodells kommt die Wasserscheidentransformation (WST) zum Einsatz. Diese Bildverarbeitungsmethode interpretiert die Grauwerte im Bild als Höhen. Bei langsamer Flutung des Höhenreliefs mit Wasser entstehen an Grauwerttälern Wasserbecken, die durch Grauwertgrate, die sogenannten Wasserscheiden, getrennt werden. Ziel dieser Methode ist die Extraktion der Wasserscheiden, die bei einer Flutung entstehen. Die WST wird auf das Grauwertbild des normierten Kronenmodells angewendet. Dabei werden die Höhenwerte auf den darzustellenden Grauwertbereich (z. B. 0 ... 255) aufgeteilt. Bevor dieses Bild jedoch einer WST unterzogen werden kann, muss es noch invertiert werden, da sonst die Wasserscheiden durch die Baumkronenspitzen verlaufen würden. Eine WST, angewendet auf das invertierte Ausgangsbild, erzeugt eine Übersegmentierung im Bild, da jede Wasserscheide durch kleine Grauwertunterschiede detektiert wird. Deshalb ist eine Glättung des Bildes mit geeigneten Glättungsfiltern (z. B. Gauß-Filter) notwendig, um die dominanten Wasserscheiden zu erhalten (Abbildung 6.9). Dies setzt ebenfalls genügend Punkte im Bereich der Krone voraus.

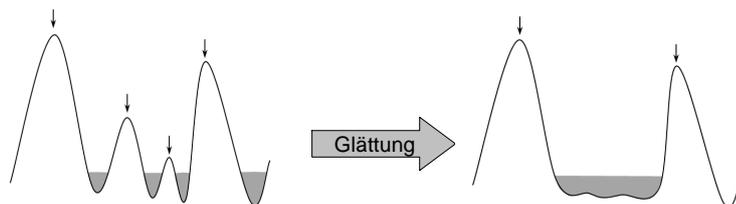


Abbildung 6.9: Prinzip der Wasserscheidentransformation mit verrauschten Daten vor und nach der Glättung.

Eine Weiterentwicklung der Methode ist die markerbasierte WST, welche in Wittscheck (2010) umgesetzt wurde, um im Gradientenbild des Kronenmodells die Bäume zu detektieren. Zunächst werden die Baumspitzen detektiert, indem iterativ mit dem höchsten Punkt in den Daten begonnen wird und die in einem zuvor definierten Radius¹⁰ r_{Krone} liegenden Punkte gelöscht werden. Diese baumspitzenbeschreibenden Marker werden in das Gradientenbild transformiert und geglättet, und ausgehend von diesen Positionen wird eine WST durchgeführt. Prinzipiell sind bei genügend dichten Punkten gute Ergebnisse in der Baumabgrenzung zu erwarten. Allerdings ist bei dieser Methode der Markerdetektion mit einem festen Radius mit Problemen zu rechnen. Wird der Kronenradius zu groß gewählt, kommt

¹⁰ Idealerweise der Mittelwert aller zu erwartenden Kronendurchmesser.

es zu einer Untersegmentierung, und Baumspitzen werden von vornherein aus den Eingangsdaten gelöscht. Wird der Radius zu klein gewählt, kommt es zu einer Übersegmentierung, da für jeden gefundenen Marker im Bild auch ein Segment in der WST gebildet wird. Problematisch ist allerdings die Anwendung bei Nadelbäumen. Durch die im Vergleich zu Laubkronen kleine Kronenfläche und durch die spitz zulaufende Krone kann bei der Lasermessung die Kronenspitze genau zwischen zwei Punkten liegen und damit nicht zuverlässig erfasst werden.

6.2.2.2 Erweiterte lokale Maximasuche mit Filterung

Die von Pech (2010) vorgestellte Methode bestimmt Näherungswerte der Baumstandorte anhand des Rasterbildes des nDKM. Dies hat den Vorteil, dass bereits bewährte Bildverarbeitungstechniken genutzt werden können. Mit einem 3x3 Pixel großen Strukturelement wird nach lokalen Maxima im Rasterhöhenbild gesucht. Dabei bildet das Mittelpixel des Strukturelements ein Maximum, wenn es größer als seine acht Nachbarn ist. Da die direkte Suche aufgrund der vielen Höhenvariationen und Lücken innerhalb einer Baumkrone zu vielen Maxima führt und somit eine Übersegmentierung bewirkt, werden zunächst zwei Filter auf das nDKM angewendet. Die Kombination aus einem Median- und einem im Anschluss angewendeten Gauß-Filter (Persson, 2001; Koch et al., 2006) bewirkt eine Glättung der Daten.

In einem zweiten Schritt werden die gefundenen lokalen Maxima auf Nachbarschaft geprüft. Befinden sich mehrere Maxima innerhalb eines zuvor definierten Radius $r_{Nachbars}$, wird nur der höchste Baum zur Auswertung verwendet und die kleineren Bäume werden verworfen. Letztendlich werden die Laserscannerrohdaten verwendet und alle Punkte innerhalb eines bestimmten Suchradius r_{Punkte} um die genäherten Baumpositionen analysiert. Ist eine minimale Punktzahl vorhanden, wird aus den n größten Punkten über Mittelwertbildung die endgültige Baumspitze bestimmt.

6.2.3 Punktzuordnung

Der Registrierprozess setzt homologe Baumpaare in den ALS- und TLS-Daten voraus. Da in den beiden Datensätzen die Baumpositionsbestimmung an unterschiedlichen Stellen am Baum durchgeführt wird (am Stamm und in der Krone), findet zunächst noch eine Reduzierung der Baumpositionen auf das DGM statt.

Die automatische Bestimmung von homologen Punktpaaren aus zwei unterschiedlichen Datensätzen verlangt aufgrund der verschiedenen Aufnahmerichtungen und Detektionsalgorithmen ein robustes Verfahren. Bei der Bestimmung der Baumkrone spielen die artspezifische Wuchsform, der Windeinfluss und das Aufnahmeverfahren eine entscheidende Rolle, was dazu führt, dass die 2D-Koordinaten des Stammes und der Krone nicht notwendigerweise übereinstimmen. Ein weiterer Aspekt ist, dass aufgrund von abgeschatteten und nicht detektierten Bäumen im TLS-Datensatz und von Fehldetektionen im ALS-Datensatz nicht immer eine Homologie zustande kommt.

Die vorgestellten Methoden der Distanz- und Winkelmuster liefern keine zuverlässigen Punktzuordnungen, sobald sehr großen Punktmengen mit symmetrischen Baumanordnungen, Distanzmehrdeutigkeiten (bei Plantagen) und Fehldetektionen der Bäume vorliegen. Ein geeignetes und robustes Verfahren zur Ermittlung der korrekten Korrespondenzen einer Helmert-Transformation (mit 6 Parametern) ist der RANSAC-Algorithmus. Mit dem im vorherigen Abschnitt vorgestellten Programm wurde die Punktzuordnung mit dem RANSAC-Verfahren realisiert.

6.2.4 Transformation

Die Transformationsparameter zur Überführung beider Systeme in ein einheitliches Koordinatensystem werden mit den homologen Punktpaaren bestimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Lage von Baumspitze und Stammmittelpunkt kann auf diese Weise allerdings nur eine erste Grobregistrierung erreicht werden. In einem weiteren Schritt müssen die Punktwolken noch zueinander ausgerichtet werden. Diese Feinregistrierung wird über die klassifizierten Bodenpunkte beider Punktwolken mit dem ICP-Algorithmus durchgeführt. Ebenes Gelände hat hier den Nachteil, dass die Punktwolken in der Höhe angepasst werden, allerdings in der Lage erneut verschoben werden können. Vorteilhafter ist das Vorhandensein von coupiertem Gelände, da hier neben der Höhe auch die Lage eindeutig korrigiert werden kann.

6.2.5 Diskussion

Hinsichtlich der Registrierungsmethode mit RANSAC könnte zusätzlich neben der geometrischen Lageinformation ein Merkmalsvektor (mit Baumhöhe, Kronendurchmesser etc.) die Kombinatorik einschränken und damit die Zuordnung beschleunigen. Die Nutzung von Full-Waveform-Daten bietet zusätzlich die Möglichkeit der Erfassung von Stämmen und Ästen innerhalb der Krone. Neben den Bodenpunkten von ebenem Gelände können die Stammpunkte im ICP-Algorithmus mitverwendet werden und – auch in ebenem Gelände – eindeutigere Ergebnisse hinsichtlich der Lage liefern. Ein weiterer Faktor, der Einfluss auf die Registrierung hat, ist eine synchrone Datenaufnahme. Erntemaßnahmen, die zwischen den Aufnahmezeitpunkten stattfanden, haben aufgrund der robusten RANSAC-Zuordnung kaum Einfluss. Allerdings kann nachgewachsene, dichte Bodenvegetation die Ausrichtung über ICP in der Höhe beeinflussen.

Um die Zuordnung zu unterstützen, können grobe Näherungspositionen aus GPS-Messungen den Zuordnungsbereich eingrenzen, was gerade in Forstplantagen von Vorteil ist. Zukünftige Anwendungsgebiete könnte diese Art von Registrierung in der autonomen Navigation von Forst- und Erntemaschinen (Rossmann et al., 2010) finden. Auch die Ausrichtung der Laserscans von räumlich getrennten Probekreisen bei der Forstinventur könnte mit dieser Methode gelöst werden und ermöglicht eine weiterführende Datenverwaltung in einem Forst-GIS. Zu guter Letzt ist zu erwähnen, dass eine Genauigkeitssteigerung bei der Baumhöhenbestimmung mit diesen kombinierten Punktwolken zu erwarten ist.

7 Validierung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Algorithmen und Ansätze, die in den Abschnitten 5 und 6 vorgestellt wurden, getestet und analysiert. Datengrundlage der Analysen sind die in Abschnitt 4.1 vorgestellten Studiengebiete. Bei Verwendung anderer Laserscannerdatensätze wird dies an entsprechender Stelle erwähnt und eine Kurzcharakterisierung der Daten gegeben. Die Auswertung untergliedert sich in drei Bereiche. Als Erstes werden die Algorithmen zur Ableitung der forstinventurrelevanten Baumparameter analysiert und statistisch bewertet. Den zweiten Teil bilden Tests zur Registrierung terrestrischer Laserscannerdaten von Waldgebieten. Die Registrierung von Flugzeuglaserscannerdaten mit terrestrischen Laserscannerdaten ist Gegenstand des dritten Auswertabschnittes. Der jeweilige Unterabschnitt wird mit einer Diskussion und einer kritischen Bewertung beendet.

7.1 Ableitung forstinventurrelevanter Baumparameter

7.1.1 Baumparameter

Anhand des Buchenbestandes im Tharandter Wald und der Studiengebiete im Wiener Wald (Abschnitt 4.1) werden in den kommenden Abschnitten die extrahierten Baumparameter untersucht und validiert. Die Unterschiede beider Untersuchungsgebiete liegen im Aufnahmeinstrument und in der Aufnahmekonfiguration. Während der Buchenbestand im Single- sowie Multiple-Scan-Verfahren von einem Riegl LMS-Z420i gescannt wurde, wurden die Plots im Wiener Wald nur von einem Standpunkt und mit dem Faro LS 880 aufgenommen.

7.1.1.1 Baumdetektionen

7.1.1.1.1 Segmentierung in der Punktwolkschicht

Wiener Wald – Clustermethode

Die 26 Plots der österreichischen Studiengebiete beinhalteten insgesamt 547 sichtbar stehende Bäume, von denen 238 bei der Winkelzählprobe (WZP) einer BHD- und Baumhöhenmessung unterzogen wurden. Nach Anwendung der Grobsegmentierung wurden 593 Objekte als Baum klassifiziert. Darunter waren 533 erfolgreich detektierte Bäume, mit 224 Bäumen aus der WZP. Unter Beachtung der Bäume aus der WZP entspricht dies einer Detektionsrate von 94,1 %. Dennoch konnten 14 Bäume aus der WZP nicht detektiert werden (Fehler 1. Art). Des Weiteren wurden unter allen detektierten Objekten 60 Bäumen zu viel detektiert (Fehler 2. Art). In Tabelle 5 sind die Detektionsergebnisse zusammengestellt. Abbildung 7.1 zeigt die Detektionsfehler, aufgeteilt nach den vorhandenen Plotarten.

Tabelle 5: Ergebnisse der Baumdetektion der Single-Scan-Aufnahmen der Studiengebiete im Wiener Wald.

	Grobsegmentierung
Anzahl Bäume insgesamt	547
Anzahl Bäume aus WZP	238
klassifizierte Bäume	593
korrekt detektierte Bäume insgesamt	533
korrekt detektierte Bäume WZP	224
Fehler 1. Art	14
Fehler 2. Art	60
Detektionsrate insgesamt	97,4 %
Detektionsrate WZP	94,1 %

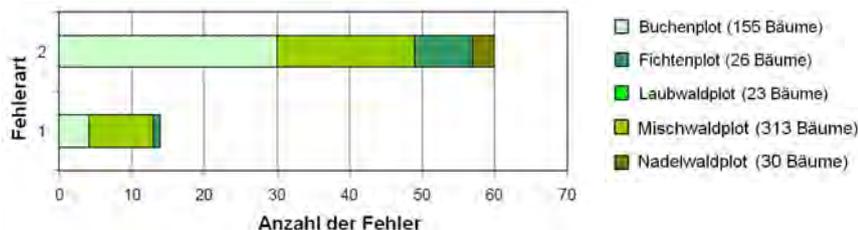


Abbildung 7.1: Detektionsfehler, aufgeteilt nach den vorhandenen Plotarten (Bienert & Scheller, 2008).

Die Grobsegmentierung in der Punktwolkschicht liefert in Beständen mit wenig Bodenvegetation und mit einer astfreien unteren Stammregion, was für den Großteil der Studiengebiete im Wiener Wald zutrifft, sehr gute Ergebnisse. Im Fall eines Bestandes mit tief ansetzenden Ästen ist es allerdings notwendig, eine Feinsegmentierung anzuschließen. An einer Aufnahme eines dichten Fichtenbestandes mit Ästen im unteren Stammbereich wird der Erfolg der Grob- und Feinsegmentierung in der Punktwolkschicht dargestellt. Das Testgebiet (Abbildung 7.2 a) wurde im März 2007 mit dem Faro LS 880 in Aberfoyle, Schottland, mit einer Scanauflösung von $0,036^\circ$ von der Firma TreeMetrics Ltd. aufgenommen und hat ein Alter von 34 Jahren. Die Baumdetektion wurde in einem Umkreis von 10 m auf Grundlage einer 360° -Single-Scan-Aufnahme durchgeführt. Abbildung 7.2 b zeigt in Rot Beispiele von Begrenzungsboxen der zurückgewiesenen Objekte in der Grobsegmentierung. Wie zu erkennen ist, wurde ein Baum aufgrund seiner Astpunkte nicht detektiert. Die nachträgliche Analyse der Punktdichte der projizierten Punktwolkschicht führte zur Detektion der Stammregion (grüne Begrenzungsbox).

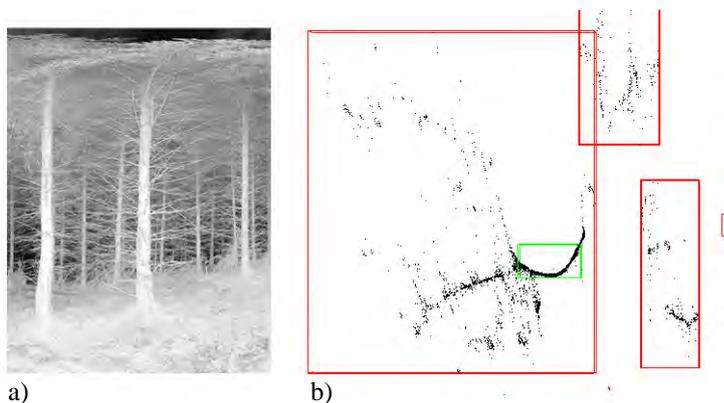


Abbildung 7.2: a) Ausschnitt eines dicht bestaeten Fichtenbestandes; b) zurückgewiesene Objekte (rot) aus der Grobsegmentierung mit detektiertem Baum (grün) nach der Feinsegmentierung durch Punktdichteanalyse.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Grob- und Feinsegmentierung dargestellt. Unter Verwendung der Grobsegmentierung betrug die Detektionsrate 38 %. Eine anschließende Feinsegmentierung steigerte die Detektionsrate auf 94 %. Letztendlich wurden durch die Punktdichteanalyse neun weitere Bäume erkannt, die in der Grobsegmentierung aufgrund vorhandener Äste nicht erfolgreich detektiert werden konnten.

Tabelle 6: Ergebnisse der Baumdetektion eines dichten Fichtenbestandes.

	Grobsegmentierung	Grob- und Feinsegmentierung
Anzahl der Bäume	16	16
klassifizierte Bäume	21	21
korrekt detektierte Bäume	6	15
Fehler 1. Art	10	1
Fehler 2. Art	15	6
Detektionsrate	38 %	94 %

Buchenbestand – Clustermethode und 2D-Hough-Transformation

Im Single-Scan-Datensatz des Buchenplots wurden mit der Clustermethode insgesamt 22 Objekte als Baum detektiert, was einer Detektionsrate von 100 % und null Fehldetektierungen entspricht. In den Multiple-Scan-Daten hingegen wurden 26 Objekte als Baum klassifiziert. Unter den Objekten waren 21 korrekt detektierte Stämme. Ein Baum wurde nicht detektiert (Fehler 1. Art) und fünf Objekte aufgrund von Ästen und Bodenvegetation (Fehler 2. Art) zu viel. Die Multiple-Scan-Punktwolke setzt sich zusammen aus zwei diametral positionierten Scannerstandpunkten außerhalb des Plotradius. Die nicht detektierten Bäume wurden teilweise durch Stämme und Äste anderer Bäume, die außerhalb des Plotradius standen, verdeckt. Die Anzahl der Punkte am Stamm erreichte somit nicht die vorgegebene Mindestanzahl in der Vorsegmentierung und die Cluster wurden zurückgewiesen.

Für dieselben Punktwolkschichten der beiden Datensätze wurde eine 2D-Hough-Transformation für Kreise durchgeführt. Die Pixel des erzeugten Rasterbildes für die Hough-Transformation repräsentieren eine Fläche von 1 cm² im Objekt. Auch hier zeigt sich ein besseres Ergebnis in der Detektionsrate bei der Single-Scan-Aufnahme mit 86 % im Vergleich zu 77 % bei der Multiple-Scan-Aufnahme. Allerdings werden die Radien im Mittel um 5 cm zu klein bestimmt. Zur Bestimmung der Näherungsposition ist die Hough-Transformation trotz Abweichungen im Dezimeterbereich im Vergleich zu den Baumpositionen aus der Clustermethode geeignet. Tabelle 7 stellt die Detektionsergebnisse der Clustermethode denen der 2D-Hough-Transformation gegenüber. Die Punktwolkschichten mit den überlagerten Houghkreisen sowie eine Tabelle zu den Mittel-, Maximal-, und Minimalwerten der Abweichungen der Radien und X- und Y-Koordinaten sind im Anhang A.4.1 zu finden.

Tabelle 7: Detektionsergebnisse der Single- und Multiple-Scan-Aufnahme des Buchenbestandes einer Punktwolkschicht mittels Clustermethode und 2D-Hough-Transformation.

	Clustermethode		2D-Hough-Transformation	
	Single-Scan-Aufnahme	Multiple-Scan-Aufnahme	Single-Scan-Aufnahme	Multiple-Scan-Aufnahme
Anzahl der Bäume	22	22	22	22
klassifizierte Bäume	22	26	19	17
korrekt detektierte Bäume	22	21	19	17
Fehler 1. Art	0	1	3	5
Fehler 2. Art	0	5	0	0
Detektionsrate	100 %	95%	86 %	77 %

Fichtenbestand

Auf der Grundlage der Aufnahme vom Sommer 2008 mit insgesamt acht verschiedenen Scannerstandpunkten wurden die Baumpositionen mit BHD und Baumhöhe automatisch abgeleitet. Mit den insgesamt 358 automatisch

detektierten Baumpositionen ist eine Aussage über die Bestandsdichte möglich. Durch Anwendung einer Delaunay-Triangulation der projizierten Baumpositionen in eine Ebene kann der mittlere 2D-Baumabstand als Mittelwert aus allen 1.054 detektierten Baumabständen bestimmt werden (blauer + roter + schwarzer Bereich in Abbildung 7.3). Der mittlere Baumabstand beläuft sich unter Ausschluss von Distanzen, die größer als 3σ sind, auf 9,14 m. Wie in Abbildung 7.3 zu erkennen ist, sind gerade an den Rändern der Triangulation sowie über der Lichtung die Abstände sehr groß, die den Mittelwert beeinflussen. Eine Verteilung der relativen Häufigkeiten der Baumabstände im Bestand ist im Anhang A.4.2 dargestellt.

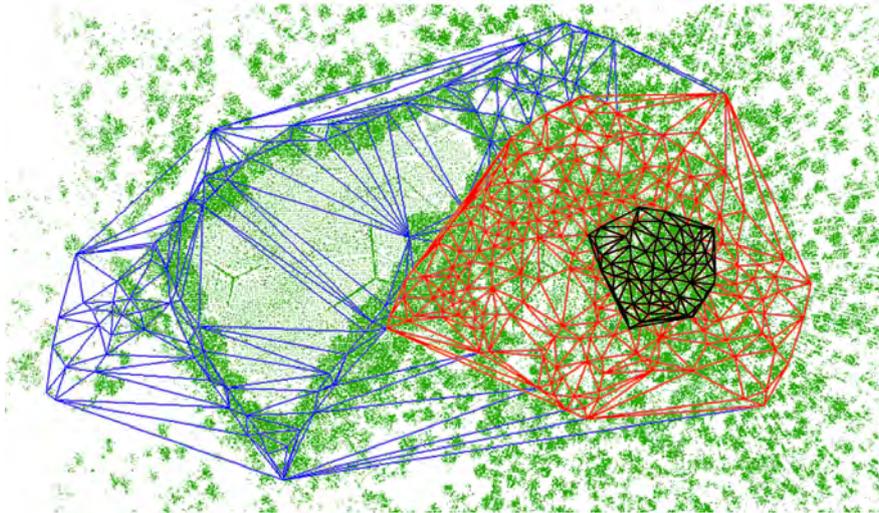


Abbildung 7.3: Überlagerte Delaunay-Triangulation der detektierten Bäume aus dem TLS-Datensatz mit der ausgedünnten Punktwolke der Aufnahme vom Sommer 2008.

Aus der triangulierten Fläche und der Baumanzahl lässt sich zusätzlich die Bestandsdichte ableiten, die aufgrund des Wildackers im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes variiert. Teilt man die Bereiche in zwei Gebiete ein, ergeben sich unterschiedlich starke Bestandsdichten. Die Bäume im Umkreis von 30 m um den Hauptturm (Abbildung 7.3, schwarzer Bereich) weisen eine Dichte von 450 Bäumen pro Hektar auf, während der komplette Bereich östlich der Lichtung (schwarzer und roter Bereich) eine Bestandsdichte von nur 230 Bäumen pro Hektar aufweist. Verglichen mit der aus Forstinventuren bestimmten aktuellen Bestandsdichte des östlichen Bestandes von 335 Bäumen pro Hektar entspricht dies einem Unterschied von 32 %. Beeinflusst wird diese Unterschätzung der Bestandsdichte weniger durch die vorhandenen Waldwege und eine weniger dicht bewachsene Fläche aufgrund von Rodung im Jahre 2002 (Feigenwinter et al., 2004) als vielmehr von den großen Distanzen am Rand des Gebietes und von fehlenden Bäumen aus der Baumdetektion im Randbereich.

7.1.1.1.2 Segmentierung im Entfernungsbild

Ein Standpunkt aus der Multiple-Scan-Aufnahme des Buchenbestandes bildete die Grundlage der Segmentierung im Entfernungsbild. Die Punktwolke ist in ihrer Ausdehnung vertikal auf $\Delta v = 63,45^\circ$ und horizontal auf $\Delta \varphi = 74,13^\circ$ begrenzt. Während standardmäßig in der Steuersoftware des Scanners verschiedene Darstellungen der Punktwolke, darunter auch Entfernungsbilder, angezeigt werden können (Abbildung 7.4 a), besteht dennoch nicht die Möglichkeit des Exports dieser Bilder. Aus der Punktwolke wurde in einem ersten Schritt ein 2D- und ein 3D-Entfernungsbild erzeugt (Abbildung 7.4 b). Dabei wurde der Bereich zwischen 0 m und 30 m farbcodiert dargestellt. Um die spätere Segmentierung der Bäume zu erleichtern, wurden die Bodenpunkte, die als Bodensegment alle weiteren Segmente miteinander verbinden, von der weiteren Prozessierung ausgeschlossen. Aus der horizontalen und vertikalen Ausdehnung ($\Delta \varphi$, Δv) sowie der Scanauflösung von $0,025^\circ$ ergibt sich die Auflösung des Entfernungsbildes. Um Löcher, die aufgrund einer unregelmäßigen Scanauflösung entstehen, im Entfernungsbild zu vermeiden, wurde die Scanauflösung auf $0,03^\circ$ vergrößert. Somit haben die Bilder eine Auflösung von 2.471×2.115 Pixel. Für die Codierung

des Entfernungsbereiches wurde eine Farbpalette von 1.024 Farben definiert. Die 2D- und 3D-Graustufenbilder mit 16 Bit Farbtiefe wurden ebenfalls abgespeichert.

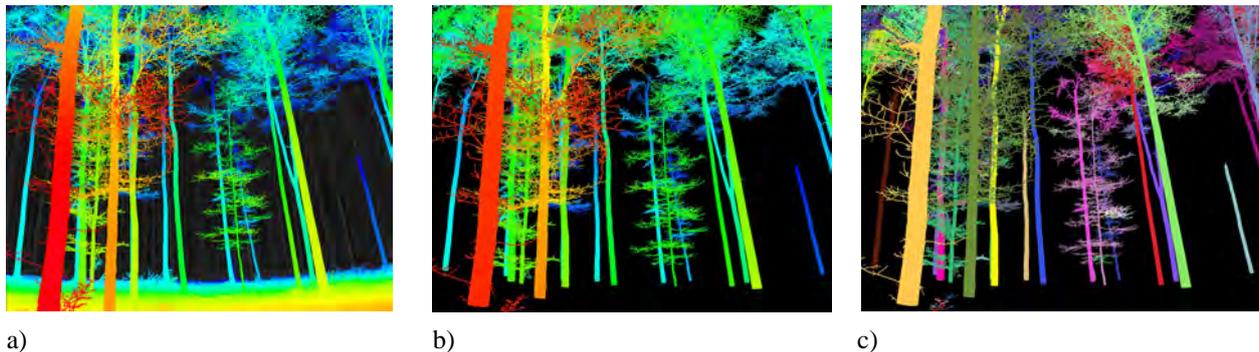


Abbildung 7.4: a) 3D-Entfernungsbild mit Boden, erstellt mit RiSCAN PRO (Entfernungszuwachs: rot-gelb-grün-blau); b) 2D-Entfernungsbild ohne Boden (manuell bereinigt); c) Segmentierungs-ergebnis auf Basis des 2D-Entfernungsbildes.

Auf Grundlage der Graustufenbilder wurde ein *Region Growing* mit einem 33x33 Pixel großen Strukturelement und einem Schwellwert von 8 cm zur Erfüllung des Ähnlichkeitsmaßes durchgeführt. Tests haben gezeigt, dass ein Strukturelement dieser Größe, angewendet auf ein 2D-Entfernungsbild, die besten Ergebnisse liefert, damit Verdeckungen von Ästen überbrückt werden und somit auch alle Vegetationselemente eines Baumes zu einem Segment zusammengefasst werden. Die Größe des Strukturelementes sowie das Ähnlichkeitsmaß sind in Abhängigkeit vom Objekt und von der Scanauflösung zu wählen. Jedes Segment erhielt ein Label, welches im Bild mit einer Zufallsfarbe eingefärbt wurde (Abbildung 7.4 c). Eine vergrößerte Ansicht des segmentierten Bildes auf Basis des 2D-Entfernungsbildes ist im Anhang A.4.3 gegeben.

Aufgrund des nahezu vertikalen Verlaufs der Baumstammachsen und einer lotrechten Aufstellung des Scanners im Bestand weisen Bilder auf Basis von Horizontaldistanzen (2D-Entfernungsbilder) weniger Grauwertsprünge entlang des Stammes auf als 3D-Entfernungsbilder auf Basis von Schrägdistanzen. Dieser Effekt wird bei nah stehenden Bäumen speziell im oberen Stammbereich deutlich (Abbildung 7.5, roter Kasten) und wirkt sich positiv auf die Segmentierung aus.

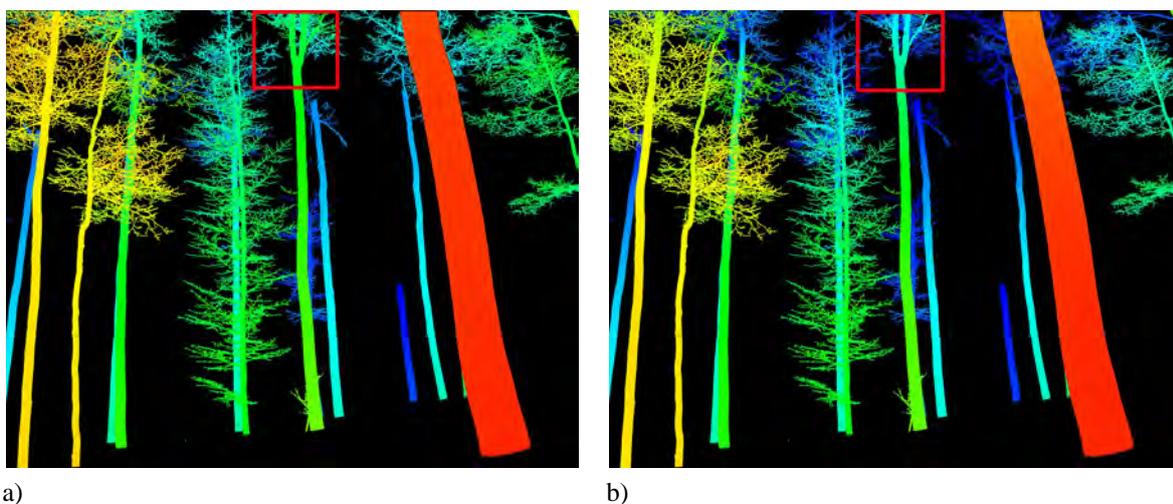


Abbildung 7.5: a) 2D-Entfernungsbild und b) 3D-Entfernungsbild des Buchenbestandes eines lotrechten Scannerstandpunktes.

7.1.1.1.3 Segmentierung im Voxelraum

Die Punktwolke einer 10 m x 10 m großen Fläche mit einer Höhe von 32,5 m wurde in einen Voxelraum mit 10 cm großen Voxeln transformiert. Insgesamt enthielt die Punktwolke sechs Fichten, die sich in der Nähe des Hauptturmes im reinen Fichtenbestand befanden. Knapp 2,25 % des Gesamtvolumens des Voxelraums (73.150 Voxel) waren mit Laserscannerpunkten belegt. Nach dem Prozess des *Region Growings* wurden 3.125 Voxelsegmente gebildet, von denen sieben Segmente eine deutlich höhere Voxelanzahl aufwiesen, da sie die Stämme und das DGM repräsentieren (Abbildung 7.6).

Nach dem zweiten Schritt, der Segmentzusammenführung (Abschnitt 5.3.4) mit einem Grenzwert s_{max} von 40 cm, verblieben nur noch 20 Segmente. Das Voxelsegment, das u. a. das Gelände repräsentiert, beinhaltete 20.513 gefüllte Voxel. Die restlichen sechs Segmente, die die Bäume enthalten, haben eine Segmentgröße von 4.941 bis 8.592 zusammenhängenden Voxeln. Kleinere Voxelsegmente, die aufgrund zu großer Lücken zwischen den Voxeln entstehen, sind speziell noch im Kronenbereich vorhanden und zeichnen sich durch eine geringere Voxelanzahl aus.

Der Erfolg der Segmentierung hängt zum einen von der Aufnahmeconfiguration und zum anderen von der Baumart ab. Tests haben gezeigt, dass die Multiple-Scan-Aufnahme bessere Segmentierungsergebnisse liefert als Single-Scan-Aufnahmen. Erklärt wird dies durch die Lücken im Kronenraum, die in der Single-Scan-Aufnahme vermehrt vorhanden sind. Teilweise sind die Lücken so groß, dass die 2D-Entfernungen der Segmentenschwerpunkte beim Zusammenführen den Grenzwert s_{max} nicht unterschreiten. Benachbarte Kronen sollten sich nicht überlappen bzw. ineinandergreifen, da sonst eine Segmentunterscheidung nicht möglich ist. Auch dominierende Bäume, wie sie in Plenterwäldern üblich sind, bereiten Schwierigkeiten bei der Segmentierung. Prinzipiell ist die Methode für Nadelbäume besser geeignet als für Laubbäume.

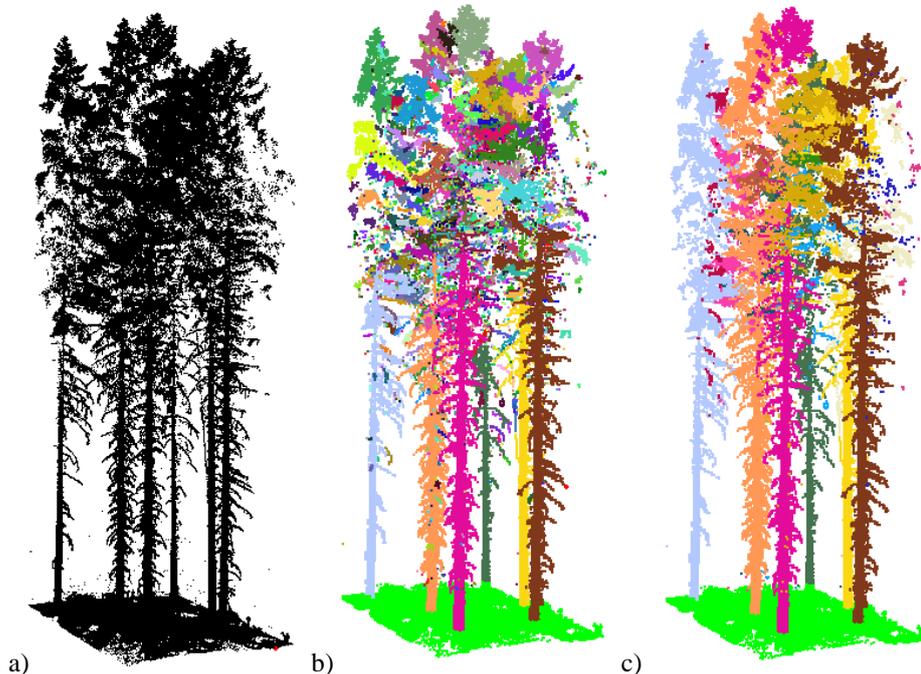


Abbildung 7.6: a) Punktwolke mit sechs Fichten; b) Voxelraum mit 3.125 farbigen Voxelsegmenten; c) Voxelraum mit 20 zusammengefassten Voxelsegmenten (Bienert et al., 2010b).

7.1.1.2 Baumfußpunkte

Um eine Genauigkeitseinschätzung der Brusthöhendurchmesserbestimmung vorzunehmen, wurden die automatisch ermittelten Baumfußpunkte aus der Single-Scan-Aufnahme des Buchenbestandes mit tachymetrisch bestimmten Baumfußpunkten verglichen. Aufgrund der vorhandenen Geländeneigung von 6° ist das Stichprobengebiet des

Buchenbestandes zur Validierung der Baumfußpunktbestimmung ideal. Die tachymetrische Aufnahme erfolgte durch Aufstellung der Messperson am hangaufwärts liegendem Baumfußpunkt. Der Reflektorstab wurde neben den Füßen am Waldboden lotrecht aufgehoben und dabei beachtet, dass die Reflektorspitze nicht in den Waldboden eindringt. Durch das Eigengewicht der Person wurde der Waldboden an der Messstelle komprimiert. Dies lässt vermuten, dass die tachymetrisch gemessenen Baumfußpunkte tiefer liegen müssten als die automatisch detektierten, die aus dem Waldboden der berührungslosen Lasermessung bestimmt werden.

Der Vergleich der automatisch mit den tachymetrisch bestimmten Baumfußpunkthöhen ergab eine maximale Abweichung von 24,4 cm, eine minimale Abweichung von -0,04 cm sowie eine Standardabweichung von 6,9 cm (Abbildung 7.7). Im Mittel wurden die Baumfußpunkte 1,93 cm oberhalb der tachymetrischen Fußpunkte bestimmt. Das heißt, die automatisch detektierten Baumfußpunkte befinden sich über den realen Fußpunkten, was einen etwas zu hohen BHD-Ansatz im Vergleich zu manuellen Messungen zur Folge hat. Da erfahrungsgemäß bei gesunden Bäumen im Bereich des BHD keine starke Durchmesserabnahme (Abholzigkeit) zu erwarten ist, ist diese Abweichung vertretbar. Problematisch sind lokale Stamminhomogenitäten wie Beulen und Knoten, die aufgrund des zu hohen BHD-Ansatzes zu einer fehlerhaften Messung im Vergleich zur manuellen Messung führen.

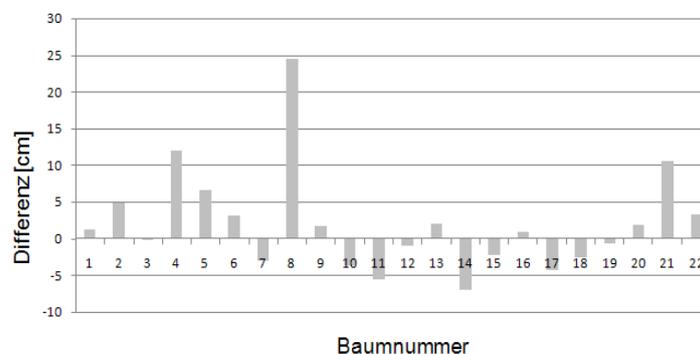


Abbildung 7.7: Abweichung der tachymetrisch und automatisch detektierten Baumfußpunkte einer Single-Scan-Aufnahme (automatisch-tachymetrisch) (Bienert & Scheller, 2008).

7.1.1.3 Durchmesser

7.1.1.3.1 Wiener Wald (Single-Scan-Aufnahmen)

Für die folgende Analyse lagen 170 manuell – mit Kluppe – gemessene BHD-Werte von ausgewählten Bäumen der Studienggebiete des Wiener Waldes zugrunde. Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse der automatischen BHD-Bestimmung in den Single-Scan-Aufnahmen, getrennt nach Baumarten, mit einem ausgleichenden Kreis. Neben den aufgeführten BHD-Werten sind ebenfalls die Messungen des Azimuts und der Strecke aufgeführt. Die Werte ergeben sich aus der Differenz der automatisch und manuell abgeleiteten Parameter. Die Azimute wurden mit einem Peilkompass und die Strecken mit einem Messband bestimmt. Bei der TLS-Aufnahme wurde die Nullrichtung des Scanners zuvor mit dem Kompass nach Norden ausgerichtet. Somit ergeben sich vertretbare Genauigkeiten in der Azimut- und Streckenbestimmung, die im Grad- bzw. Dezimeterbereich liegen und eine eindeutige Baumzuordnung immer noch ermöglichen.

Tabelle 8: Ungefilterte und gefilterte Ergebnisse der automatischen BHD- und Positionsbestimmung der Studiengebiete im Wiener Wald, nach Baumarten getrennt; der Wert gibt die Differenz der automatisch und manuell abgeleiteten Werte an.

		Tanne			Fichte			Kiefer			Buche		
		Azimuth [°]	Strecke [m]	BHD [cm]									
ungefiltert	Anzahl	8			65			23			74		
	Minimum	-5,26	-0,42	-3,04	-14,19	-0,71	-29,87	-30,48	-0,15	-7,80	-8,91	-1,05	-47,29
	Maximum	1,58	0,35	3,37	48,57	1,12	37,00	4,80	0,27	6,59	6,01	0,83	49,90
	Mittelwert	-0,89	0,04	0,44	-1,57	0,12	-1,90	-4,14	0,13	-0,73	-0,79	0,12	1,50
	σ_0	2,68	0,24	2,39	7,46	0,24	9,12	8,17	0,11	3,15	3,49	0,23	9,88
gefiltert	Anzahl	6			50			17			62		
	Minimum	-5,26	-0,42	-1,36	-14,19	-0,44	-11,06	-30,48	-0,15	-5,67	-8,89	-0,57	-7,53
	Maximum	1,58	0,35	3,37	14,05	1,12	4,12	4,80	0,27	6,59	6,01	0,83	12,56
	Mittelwert	-0,28	0,15	1,44	-2,63	0,13	-0,08	-3,87	0,15	-0,15	-0,58	-0,50	0,73
	σ_0	2,52	0,10	1,78	4,20	0,23	2,63	8,01	0,10	2,82	3,47	0,18	3,12

Im oberen Teil der Tabelle wurden alle 170 BHD-Messungen in der Analyse berücksichtigt, während im unteren Teil nur 135 gefilterte Bäume verwendet wurden. Die Filterung erfolgte anhand des Qualitätsmaßes P_d der Durchmesser. Durchmesser mit einem $P_d \geq 0,70$ weisen auf eine genaue und zuverlässige Durchmesserbestimmung hin. Anhand der BHD-Standardabweichungen ist nach Filterung eine deutliche Genauigkeitssteigerung zu erkennen. Ein Großteil der fehlerhaft bestimmten BHD aufgrund von verdeckten Stammbereichen und Astpunkten konnte eliminiert werden. Die Baumart mit der kleinsten Standardabweichung von 1,78 cm ist die Tanne. Allerdings ist die geringe Anzahl von sechs Bäumen, die der Berechnung zugrunde lagen, nicht unbedingt repräsentativ. Bei der Kiefer, die eine strukturiertere Rinde hat als die Fichte, ist die Standardabweichung von 2,82 cm ähnlich der Standardabweichung der Fichte mit 2,63 cm. Die Buche, die zu den Vertretern der glatten Rinden gehört, hat die größte Standardabweichung. Dies ist u. a. dadurch zu erklären, dass Buchen im Stammquerschnitt sehr flache Stammbereiche aufweisen. Wird im Single-Scan nur dieser Bereich aufgenommen, kommt es zu einem sehr großen BHD, der teilweise doppelt so groß ist wie der reale Stamm. Dies lässt vermuten, dass Multiple-Scan-Aufnahmen eine Genauigkeitssteigerung bringen, da ovale Stämme besser erkannt werden.

7.1.1.3.2 Buchenbestand (Single- und Multiple-Scan-Aufnahmen)

Für das Studiengebiet im Buchenbestand im Tharandter Wald liegen Single- und Multiple-Scan-Aufnahmen vor. Die automatisch detektierten Baumparameter wurden, getrennt nach Aufnahmekonfiguration, mit den manuell erfassten Parametern verglichen. In Tabelle 9 sind die Minimal-, Maximal- und Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Differenzen zwischen automatisch und manuell bestimmten Parametern aufgeführt. Insgesamt wurden im Umkreis von 15 m in der Punktwolke der Single-Scan-Aufnahme 22 Bäume detektiert, während in der Multiple-Scan-Punktwolke ein Baum weniger detektiert wurde. Neben der standardmäßigen Kluppenmessung BHD_z , mit ausgerichteten Schenkeln zum Plotzentrum, wurde für jeden Baum jeweils noch der größte Bruthöhendurchmesser BHD_G erfasst. Betrachtet man auch hier nur die Werte für die BHD, so wird ersichtlich, dass bei der Single-Scan-Aufnahme die Durchmesser BHD_z im Mittel 0,31 cm zu groß bestimmt werden. Werden die Werte allerdings mit dem größten gemessenen BHD verglichen, findet eine Unterschätzung statt. Auffällig ist die schlechtere Genauigkeit der Multiple-Scan-Aufnahme im Vergleich zur Single-Scan-Aufnahme. Im Mittel werden die BHD um bis zu 1,5 cm zu klein bestimmt.

Tabelle 9: Ergebnisse des Buchenbestandes, getrennt nach Azimut, Strecke, BHD_z , BHD_G und Ellipse (der Wert gibt die Differenz der automatisch und manuell abgeleiteten Werte an).

		Anzahl Bäume	Azimut [°]	Strecke [m]	BHD_z [cm]	BHD_G [cm]	Ellipse [cm]
Single-Scan	Minimum	21	-11,08	-0,20	-2,58	-2,58	
	Maximum		10,41	0,11	4,38	3,11	
	Mittelwert		-0,98	0,01	0,31	-0,61	
	Standardabweichung		5,07	0,09	1,73	1,46	
Multiple-Scan	Minimum	22	-11,04	-0,24	-3,95	-5,24	-2,25
	Maximum		10,52	0,13	2,75	2,62	2,60
	Mittelwert		-0,83	0,00	-0,51	-1,45	0,43
	Standardabweichung		5,13	0,10	1,87	1,97	1,28

Tabelle 9 zeigt, dass eine Single-Scan-Aufnahme eine Genauigkeitssteigerung bei der Durchmesserbestimmung bringt. Nach visuellem Vergleich der Stammprofile wird deutlich, dass größtenteils ovale Stammquerschnitte vorliegen, denen mit einer ausgleichenden Ellipse entgegengewirkt werden kann. Die größte Halbachse der ausgleichenden Ellipse der Multiple-Scan-Daten wurde mit der größten Durchmessermessung am Stamm verglichen. An Abbildung 7.8 wird deutlich, dass trotz gleicher Scanauflösung der Scannerpositionen aufgrund der unterschiedlichen Abstände zum Stamm eine unterschiedliche Punktdichte erzeugt wird. Dabei entstand eine Standardabweichung von 1,28 cm, was eine Verbesserung zu den Single-Scan-Daten darstellt. Dennoch ist im Mittel eine leichte Überbestimmung des Durchmessers vorhanden.

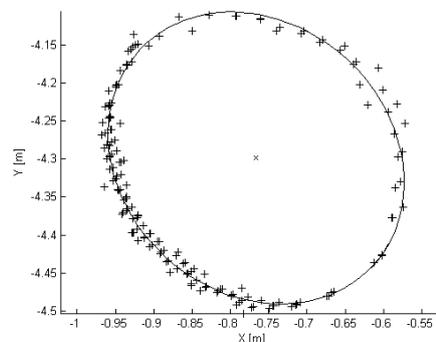


Abbildung 7.8: Ausgleichende Ellipse eines Buchenstammprofils einer Multiple-Scan-Aufnahme.

7.1.1.3.3 Profile entlang der Baumstammachsen

Die Profilbestimmung entlang der Stammachsen hängt zum einen von der Baumart (Kronendichte und Kronenform) und der Scanpunktdichte (Auflösung) ab. Ist der Kronenbereich sehr dicht, wird das Vordringen der Scanpunkte bis zur Stammoberfläche erschwert. Die meisten Reflexionen werden von Ästen erzeugt. Sind genügend Punkte auf der Stammoberfläche vorhanden, können noch in höheren Stammbereichen sehr genaue Stammprofile aus einer Single-Scan-Aufnahme bestimmt werden. In Abbildung 7.9 sind die Stammprofile von 28 Sitka-Fichten (*Picea sitchensis*) in einem Abstand von 10 cm entlang des Stammes dargestellt. Der Bestand wurde im Herbst 2006 von der Firma *TreeMetrics Ltd.* im Single-Scan-Verfahren mit einem Faro LS 880 aufgenommen und hatte ein Alter von 35 Jahren. Im Mittel wurde der letzte erfolgreiche Stammdurchmesser in einer Höhe von 9,4 m bestimmt. Der höchste (letzte) bestimmbare Stammdurchmesser wurde in 13,6 m und der niedrigste (letzte) Stammdurchmesser in 5,9 m über dem Gelände eingepasst.

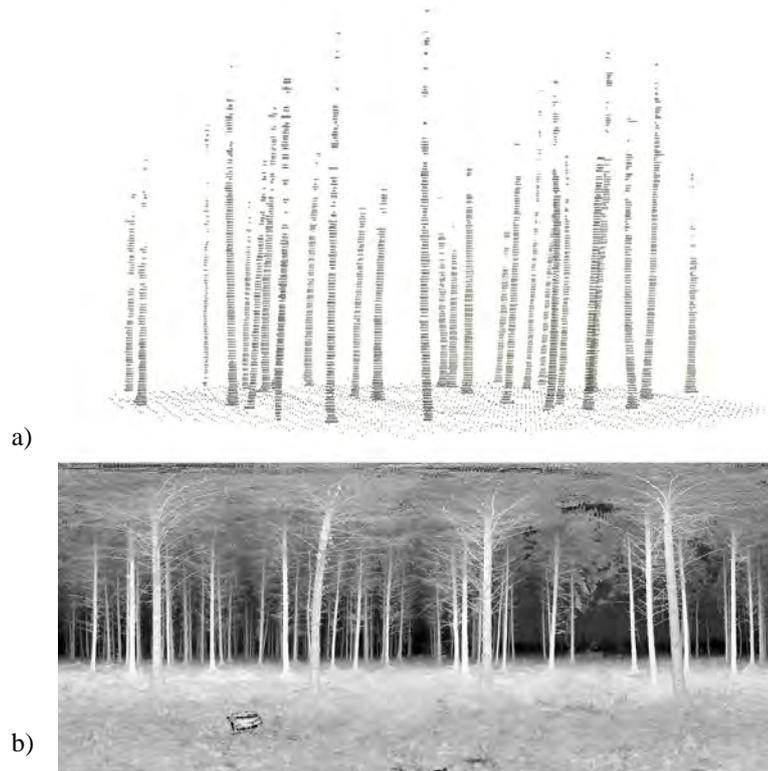


Abbildung 7.9: a) 3D-Ansicht der Stammprofile eines Sitka-Fichten-Plots mit 15 m Plotradius und DGM-Punkten; b) 2D-Intensitätsbild des Plots.

Die Bäume des Plots wurden nach dem Laserscanning geerntet. Ausgestattet mit Messsensoren, ist es dem Harvester möglich, die Stammlänge und die dazugehörigen Durchmesser zu bestimmen, die für den Plot gespeichert wurden. Abbildung 7.10 zeigt rechts die ausgedünnte Punktwolke eines Baumes. In der Mitte sind die Stammprofile in einem Abstand von 10 cm dargestellt. Links außen sind die Durchmesserwerte des Harvesters (schwarz) denen der automatischen Bestimmung (grau) gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass gerade am Stammfuß und in den oberen Stammbereichen sehr große Abweichungen von teilweise 10 cm auftreten. Die unteren Abweichungen werden von den Wurzelanläufern verursacht. Im oberen Stammabschnitt werden, wie bereits erwähnt, die enormen Abweichungen von den Verdeckungen am Stamm hervorgerufen. Verwendet man alle Stammdurchmesser, wird eine Standardabweichung σ_{Baum} von 5,04 cm erreicht. Betrachtet man nur die Durchmesser des Stammabschnittes zwischen 0,70 m und 7,70 m (entspricht einem Qualitätsmaß P_d von 0,7), dann halbiert sich die Standardabweichung $\sigma_{7,70m}$ zu 2,64 cm.

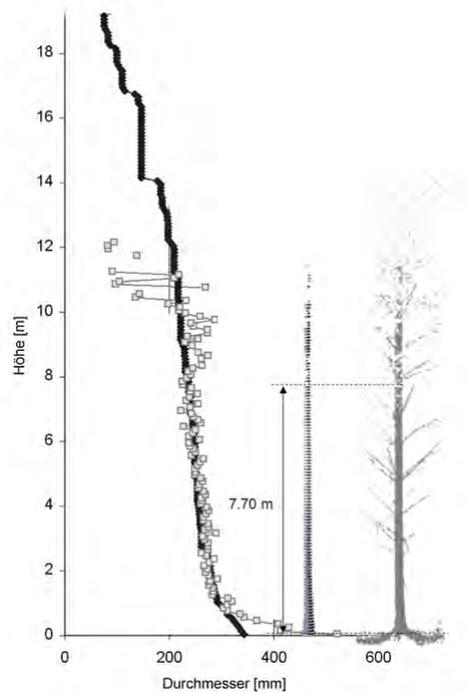


Abbildung 7.10: Automatisch bestimmte Stammdurchmesser einer Sitka-Fichte (grau) mit den Harvesterdaten desselben Baumes, in schwarz dargestellt (links); eingepasste Stammprofile (mitte); ausgedünnte Baumpunktwolke (rechts) (modifizierte Abbildung aus Maas et al. (2008)).

7.1.1.3.4 Qualitätsmaß P_d zur Durchmesserbestimmung

Die folgende Abbildung zeigt die Stammprofile dreier Fichten in Brusthöhe. Die Ermittlung des Durchmessers erfolgte über das Einpassen eines ausgleichenden Kreises in die vorliegenden Stammprofile. Zusätzlich sind in der Tabelle 10 die Qualitätsmaße (P_d) sowie die Genauigkeiten der Kreisausgleichung angegeben. Die Berechnung des Qualitätsmaßes erfolgte über die Mittelwertbildung der fünf Einzelparameter.

Wie der Tabelle 10 zu entnehmen ist, ist der Parameter P_d ein Indikator für zu groß bzw. zu klein bestimmte Durchmesser. Allerdings liefert die Größe des Parameters keine Aussage über die Größe der Abweichung des bestimmten Durchmessers vom realen Wert. Dies ist mit der Berechnungsmethode der Mittelwertbildung der Einzelparameter zu begründen.

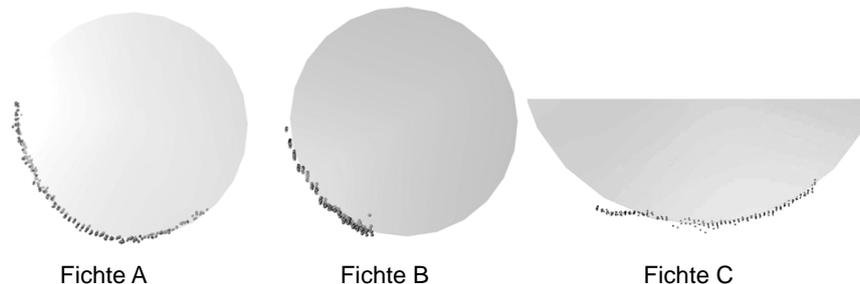


Abbildung 7.11: Ermittelte BHD (über ausgleichende Kreise) von Stammsegmenten dreier Fichten einer Single-Scan-Aufnahme (Bienert et al., 2007a).

Tabelle 10: Genauigkeitsmaße und Qualitätsmaß der Kreisausgleich dreier Fichtenprofile (modifizierte Tabelle aus Bienert et al. (2007a)).

	Fichte A	Fichte B	Fichte C
BHD_{Kluppe} [cm]	36,00	35,00	65,00
$BHD_{ausgKreis}$ [cm]	35,99	28,45	102,47
Punktanzahl n	287	200	216
$\hat{\sigma}_o$ [mm]	4,20	3,00	6,90
$\hat{\sigma}_d$ [mm]	2,20	9,60	19,30
P_d	0,75	0,58	0,46

7.1.1.4 Baumhöhenbestimmung

7.1.1.4.1 Single-Scan

Für die Single-Scan-Aufnahmen der Wiener-Wald-Gebiete liegen pro Plot und pro Baumart Baumhöhenmessungen (gemessen mit einem Ultraschall-Distanzmesser) des Grundflächenmittelstammes vor. Die restlichen Baumhöhen innerhalb eines Plots wurden mit Einheitshöhenkurven geschätzt. Die ermittelten Baumhöhen aus den Single-Scan-Punktwolken wurden zum einen den gemessenen Werten (Abbildung 7.12 a) und zum anderen den geschätzten Werten, die zufällig ausgewählt wurden (Abbildung 7.12 b), in einem Streudiagramm gegenübergestellt. Über einen Zylinder mit einem Radius von 1,5 m wurden die Bäume automatisch selektiert, um dann die Baumhöhenbestimmung mittels Differenzverfahren anzuschließen.

Die 50 gemessenen Baumhöhen in Abbildung 7.12 (links) wurden mit einer Standardabweichung σ_o von 5,93 m bestimmt. Im Mittel wurden die Laserscannerhöhen 3,30 m zu hoch bestimmt. Die positiven Abweichungen von bis zu 20,10 m stammen von größeren Bäumen in unmittelbarer Nachbarschaft, die den aktuellen Baum dominierten und in den Zylinder ragten. Die Schätzung der 40 Baumhöhen mittels Einheitshöhenkurven fällt mit einem σ_o von 5,10 m etwas besser aus. Auch der Mittelwert zeigt, dass die mit Laserscanning abgeleiteten Baumhöhen um 1,85 m überschätzt werden.

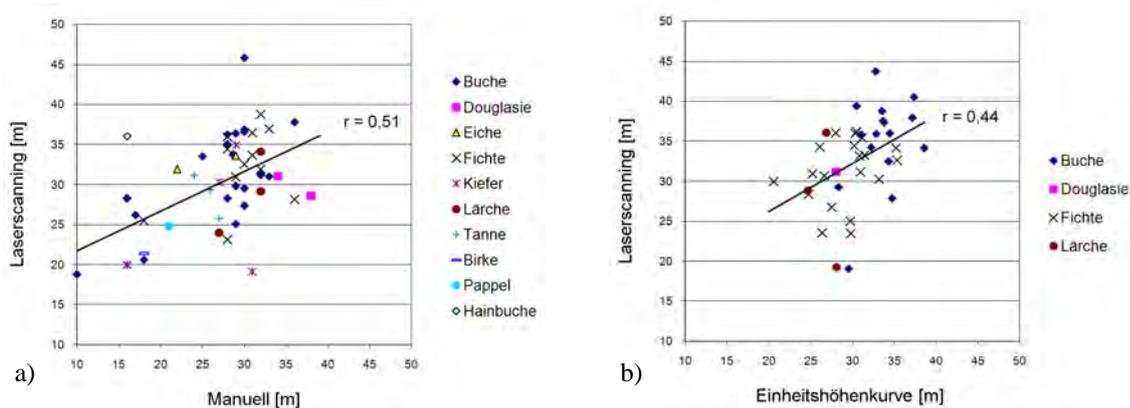


Abbildung 7.12: Streudiagramme mit Korrelationskoeffizient der Laserscannerbaumhöhen mit den manuell gemessenen Baumhöhen (a) und den Laserscannerbaumhöhen mit den geschätzten Baumhöhen über Einheitshöhenkurven (b).

7.1.1.4.2 Single- und Multiple-Scan

Die Baumhöhen des Buchenbestandes im Tharandter Wald wurden alle trigonometrisch mit einem Baumhöhenmessgerät auf Ultraschallbasis bestimmt. Der Baumradius zur Punktwolkenselektierung der Bäume wurde auf 0,8 m begrenzt. Bei beiden Aufnahmeconfigurationen wurden die Laserscannerhöhen über das Differenzverfahren und ein histogrammbasiertes Differenzverfahren ermittelt. Wie zu vermuten war, fällt die Baumhöhenmessung der Multiple-Scan-Aufnahme tendenziell besser aus als die der Single-Scan-Aufnahme. Die Blickrichtungen der verschiedenen Scannerpositionen ermöglichen eine bessere Abdeckung des Kronenraums und die Wahrscheinlichkeit, die Baumspitze von mehreren Seiten zu treffen, steigt bei mehreren Scannerpositionen. Das σ_0 der Baumhöhenbestimmung konnte durch die Multiple-Scan-Aufnahme und durch den erweiterten, histogrammbasierten Ansatz zur Höhenbestimmung verbessert werden. Dennoch sind sehr große positive Abweichungen in beiden Aufnahmeconfigurationen vorhanden, die von einer zu groß bestimmten Laserscannerhöhe verursacht werden. Werden kleinere Bäume des Unterstandes dominiert und ist die Kronenausbildung des dominierenden Baumes sehr dicht, bringt selbst der histogrammbasierte Ansatz keine Verbesserung (Tabelle 11).

Tabelle 11: Vergleich der Baumhöhenbestimmung der Single-Scan- und Multiple-Scan-Aufnahmen.

		Anzahl Bäume	Differenz- verfahren [m]	Histogrammbasiertes Differenzverfahren [m]
Single-Scan	Minimum	22	5,49	5,49
	Maximum		11,71	7,13
	Mittelwert		0,46	-0,02
	Standardabweichung		4,15	3,32
Multiple-Scan	Minimum	21	-3,79	-3,79
	Maximum		11,42	9,01
	Mittelwert		0,41	-0,08
	Standardabweichung		3,87	2,95

7.1.2 Digitales Kronenmodell

Wie in den vorangehenden Abschnitten bereits erwähnt, sind die meisten Verdeckungen im Kronenraum zu erwarten. Um eine Einschätzung bezüglich der Kronenabdeckung zu geben, wurde die Aufnahme von dem 42 m hohen Turm im Studiengebiet des Fichtenbestandes mit den Bodenaufnahmen registriert. Für eine 20 m x 27 m große Fläche, die Punkte des Hochstandpunktes sowie Punkte eines Standpunktes am Fuße des Turmes enthielt, wurde je ein Kronenmodell mit einer Rasterweite von 0,20 m erstellt, und Punkte unterhalb von 10 m wurden entfernt. Die mittlere Baumhöhe h_m aller Rasterpunkte, aufgenommen vom Bodenstandpunkt, beträgt 22,03 m und für den Hochstandpunkt 26,96 m (Abbildung 7.13). Der visuelle Vergleich sowie die abgeleiteten Baumhöhen für diesen Bereich beweisen, dass die ermittelten Baumhöhen der Bodenaufnahme nur um maximal 1 m von den Höhen der Turmaufnahme abweichen. Es werden zwar weniger Punkte im oberen Kronenbereich erfasst, dennoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Punkt der Baumspitze zugehörig ist, recht groß.

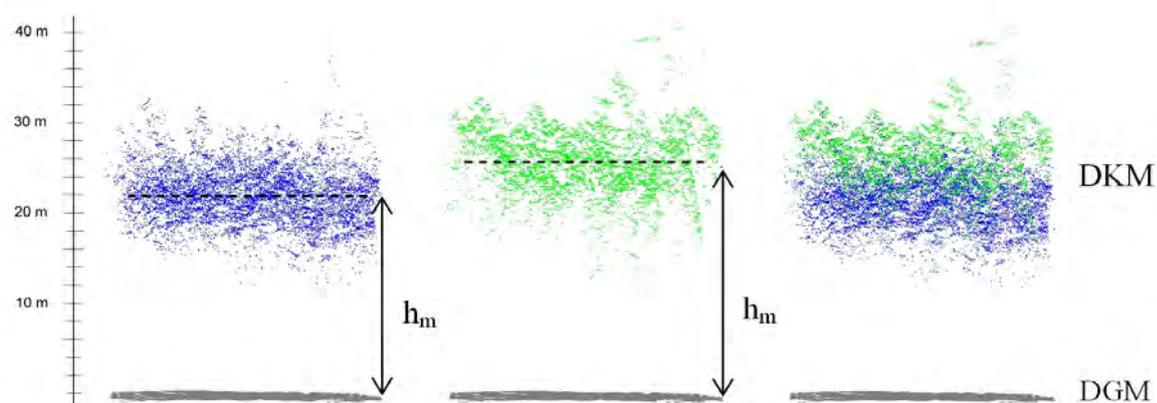


Abbildung 7.13: Einzelansichten vom DGM und DKM, aufgenommen vom Boden (blaue Punkte) und vom Turm (grüne Punkte) mit einer Rasterweite von 0,20 m (links und mitte); kombinierte Darstellung der registrierten DKM (rechts).

7.1.3 Abschattung

Je näher ein Baum am Scanner steht, um so größer ist der Bereich, den der Baum verdeckt. Für eine Plotfläche von 452,39 m² mit einem Radius von 12 m wurde exemplarisch für fünf Stämme verschiedener BHD in Abhängigkeit von der Entfernung zum Scanner der prozentuale Anteil an verdeckter Plotfläche berechnet (Abbildung 7.14). Ein Baum mit einem BHD von 30 cm und einem Abstand zum Scanner von 2 m verdeckt eine Fläche von 10,45 m², was 2,31 % der Gesamtfläche entspricht. Im Anhang A.4.4 ist in einem weiteren Diagramm die tatsächliche verdeckte Fläche in m² dargestellt.

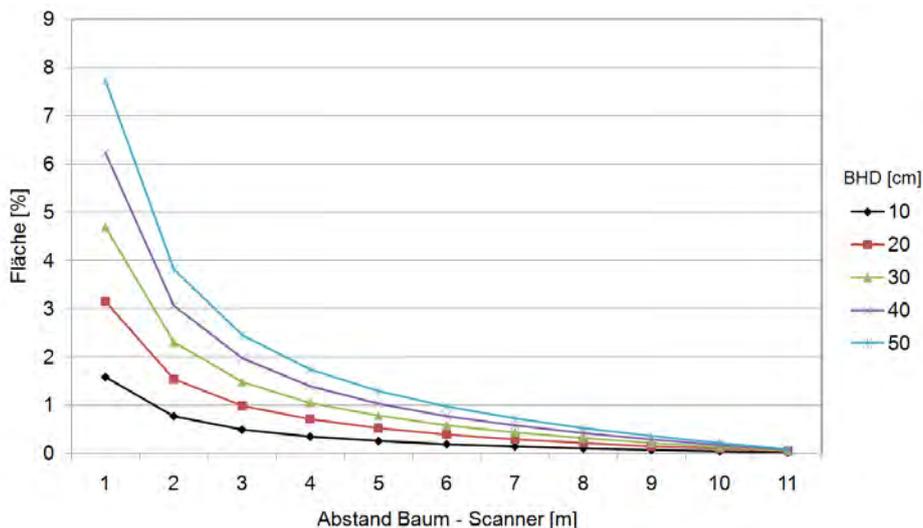


Abbildung 7.14: Verdeckte horizontale Fläche der Bäume in % in Abhängigkeit vom BHD und von der Entfernung zum Scanner.

In Waldbeständen mit einer hohen Bestandsdichte (z. B. Fichtenplantagen, in denen die Bäume in einem Raster von 2 m x 2 m angepflanzt sind) ergibt das eine Baumanzahl von 113 Bäumen pro 12 m Plot (452,39 m²). Steht man nun mittig zwischen vier Bäumen, ergibt sich ein Abstand zu den vier benachbarten Bäumen mit einem BHD von 30 cm von ca. 1,40 m. Jeder dieser vier Bäume verdeckt eine Fläche von 3,34 %, was insgesamt 13,36 % der Gesamtfläche

ausmacht. Die letztendlich verdeckte Fläche innerhalb des Plotes ist allerdings höher, da die restlichen Bäume ebenfalls für Abschattungen sorgen. Bei dieser regelmäßigen Rasteranpflanzung verdecken die Bäume alle dahinter stehenden Bäume, sobald der Scanner in einer Baumflucht aufgestellt ist.

7.1.4 Reichweite

An der Single-Scan-Aufnahme des Buchenbestandes im Tharandter Wald wurden die Routinen zur Baumdetektion unter Variation der Eingangsparameter getestet. Die Daten wurden mit einer Scanauflösung von $0,1^\circ$ aufgenommen. Wie der Tabelle 12 zu entnehmen ist, wächst mit zunehmender Schichthöhe und mit kleiner werdender Mindestpunktanzahl n_{min} je zulässigem Baumcluster die Anzahl der detektierten Bäume. Durch Variation dieser beiden Parameter wird neben der Baumanzahl auch die maximale Entfernung, in der eine Baumerkennung noch möglich ist, beeinflusst. Anhand der Single-Scan-Aufnahme des Buchenbestandes wurde ein Reichweiten- und Detektionstest durchgeführt.

Tabelle 12: *Detektionsergebnisse in Abhängigkeit von der Höhe der Punktwolkschicht und von der Mindestpunktanzahl. Unter der Baumanzahl sind die erfolgreich detektierten Bäume aufgeführt und unter der Reichweite die größte Entfernung, bei der eine Baumdetektion noch möglich war (aufgenommen mit einem Riegl LMS-Z420i Laserscanner).*

		Baumanzahl			Reichweite [m]		
Schichthöhe [m]		0,10	0,15	0,20	0,10	0,15	0,20
n_{min}	10	87	124	158	39	52	54
	20	43	63	85	24	33	37
	30	39	59	75	24	30	37

Die Anzahl der detektierten Bäume wird zudem noch beeinflusst durch die Reichweite des Laserscanners und die vorherrschende Bestandsdichte. Abbildung 7.15 verdeutlicht anhand der oben gewählten Punktwolke die Reichweite des Laserscanners. Die maximale Reichweite ist bei optimaler Reflektivität vom Hersteller mit 1.000 m angegeben. Bis zu einer Entfernung von 150 m (gestrichelte Linie) sind in der Punktwolkschicht noch mehrere Punkte am Stamm vorhanden, die allerdings mit der vorgegebenen Mindestpunktanzahl und der Schichthöhe für eine Baumdetektion nicht ausreichen. Visuell waren in 300 m Entfernung noch Stämme in der Punktwolke erkennbar.

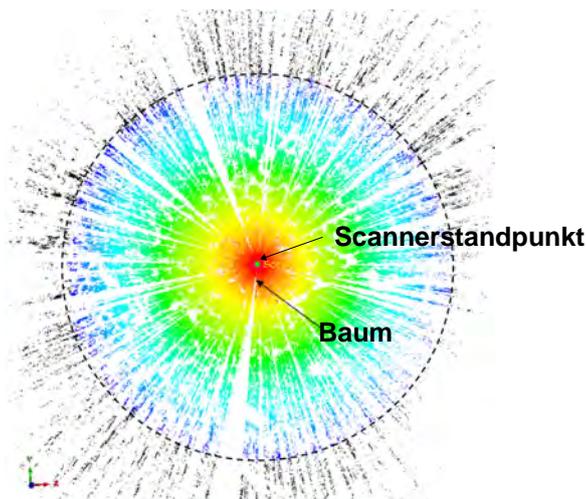


Abbildung 7.15: Nach der Entfernung farbcodierte Punktwolke in der Draufsicht (XY-Ebene), gestrichelte Linie = 150 m. Der Pfeil gibt die Position eines Baumes in 4 m Entfernung vom Scanner an. Der grüne Punkt in der Mitte der Abbildung stellt die Scanposition dar.

7.1.5 Objektbewegung

Tritt während des Scanvorganges eine Bewegung des Objektes auf, wird das Objekt nicht mehr originalgetreu wiedergegeben. Je nachdem, in welche Richtung sich das Scanobjekt bewegt (mit oder entgegen der Scanrichtung), und in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit treten verschiedene Effekte auf. Dies äußert sich in einer verzerrten Darstellung. In den nachfolgenden Beispielen werden die Bewegungen orthogonal zur Blickrichtung betrachtet.

Für den Fall einer Objektbewegung entgegen der Scanrichtung (Abbildung 7.16) wird das Objekt verkürzt dargestellt. Ist die Objektgeschwindigkeit v_{Objekt} genauso groß wie die Scangeschwindigkeit v_{Scan} , wird das Objekt halbiert abgebildet. Mit steigender Objektgeschwindigkeit (bis hin zur doppelten Scangeschwindigkeit) nimmt die Objektbreite ab, bis letztendlich nur noch vereinzelt Punkte bis gar keine Punkte erfasst werden.

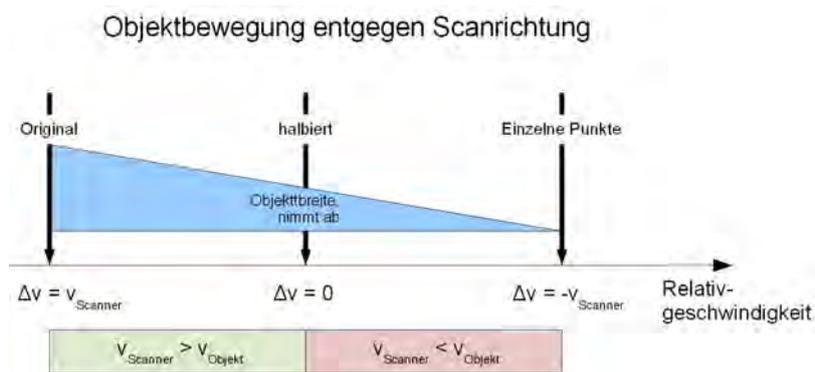


Abbildung 7.16: Abbildung des Scanobjektes in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit bei einer Objektbewegung entgegen der Scanrichtung.

Bei der Objektbewegung in Scanrichtung (Abbildung 7.17) wird mit Zunahme von v_{Objekt} das Objekt gedehnt abgebildet. Ist die Relativgeschwindigkeit $\Delta v = 0$, sind also Objekt- und Scangeschwindigkeit gleich groß, kommt es zu einer unendlich breiten Darstellung der Objektfläche. Sobald v_{Objekt} größer als v_{Scan} ist, wird das Objekt verkürzt und zudem gespiegelt dargestellt.

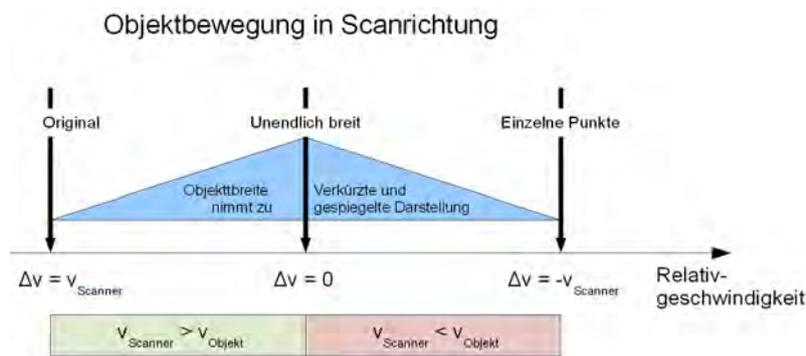


Abbildung 7.17: Abbildung des Scanobjektes in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit bei einer Objektbewegung in Scanrichtung.

Bei Bewegungen in Richtung des Scanners treten ebenfalls Effekte auf, die neben der Verzerrung eine Verschwenkung der Objektfläche beschreiben. Sind die Bewegungsrichtungen sowie die Geschwindigkeiten bekannt und wird von konstanten Werten ausgegangen, könnten die Bewegungen während des Scanvorgangs modelliert und weitestgehend kompensiert werden. Bereiche der Objektfläche, die aufgrund der Bewegung nicht erfasst wurden, bleiben unbeobachtet, und nur die Lage der bewegten Punkte wird korrigiert. Dennoch sind Korrekturen der Bewegungen von Forstaufnahmen weitaus komplexer, da aufgrund der natürlichen Krafteinwirkung (Wind) die Richtung sowie die Geschwindigkeit Schwankungen unterliegen. Hinzu kommt die zeitgleiche Bewegung der Scanvorrichtung während der Aufnahme (vertikale Scanbewegung gefolgt von einer horizontalen Verschiebung, etc.)

In Stiel (2010) wurden Tests mit einem bewegten Baumstamm durchgeführt. Während des Scanvorganges wurde der Stamm orthogonal zur Scanrichtung verschoben. Abbildung 7.18 zeigt die Intensitätsbilder ausgewählter Scanaufnahmen.

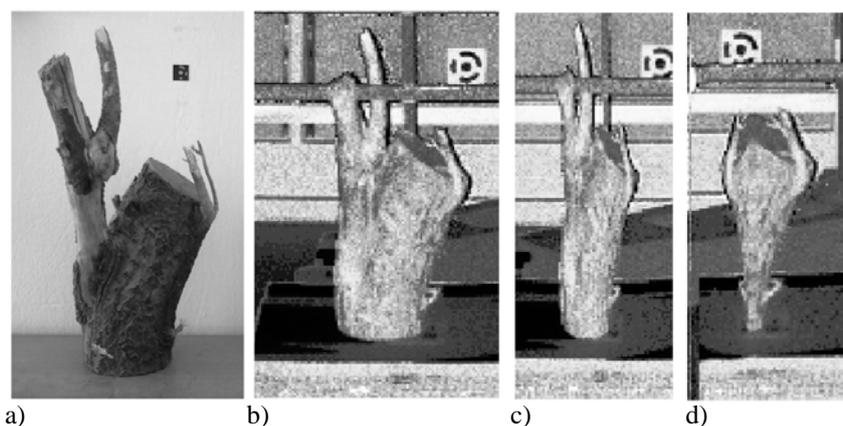


Abbildung 7.18: Verzerrte Darstellungen eines Objektes bei Bewegung orthogonal zur Blickrichtung: a) Foto; b) Intensitätsbild des Stammes im Ruhezustand; c) Intensitätsbild des Stammes bei Bewegung entgegen der Scanrichtung; d) Intensitätsbild des Stammes bei Bewegung in Scanrichtung (verkürzte und gespiegelte Darstellung mit $v_{\text{Scanner}} < v_{\text{Objekt}}$).

7.1.6 Diskussion

Bei der Detektion von Bäumen in den Laserscannerdaten treten Fehldetektionen in Form von fälschlicherweise detektierten oder gar fehlenden Bäumen auf. Da es sich bei der großflächigen Forstinventur um Stichproben im Bestand

handelt, ist die Anzahl der wenigen nicht detektierten Bäume zu vernachlässigen. Die vorgestellten Standardabweichungen der BHD-Bestimmung, die zwischen 1 cm und 2 cm liegen, sind für Zwecke der Forstinventur ausreichend. Der eingangs erwähnte Einfluss der Strahldivergenz auf die Durchmesserbestimmung ist bei den vorliegenden Daten nicht signifikant. Begründet wird dies durch die verwendeten Laserscanner mit einer Strahldivergenz von 0,25 mrad und der maximalen Entfernung zu den Bäumen von 15 m. Bei größeren Strahldivergenzen ist die Profilaufweitung zu berücksichtigen, gerade dann wenn keine ausgleichenden Verfahren zur Durchmesserbestimmung eingesetzt werden.

Betrachtet man die Baumhöhen, ist der geringe Korrelationskoeffizient von $r = 0,51$ der manuell gemessenen Höhen mit den abgeleiteten Höhen aus der Laserscannerpunktvolke nicht ausreichend. Eine Genauigkeitssteigerung wird zwar durch geeignete Scankonfigurationen und einer histogrammbasierten Bestimmung erreicht. Allerdings sind Untersowie Überschätzungen in der Höhe von -3,79 m bis +9,01 m mit einer Standardabweichung von 2,95 m nicht zu vertreten. Verbesserungen in der Baumhöhenbestimmung werden durch eine kombinierte Datenauswertung von ALS- und TLS-Daten erwartet. Die Baumfußpunktbestimmung ist eine zuverlässige und genaue Methode, selbst in geneigtem Gelände, und bildet die Basis für die BHD-Bestimmung und die darauf aufbauenden Registrierungsmethoden.

Dennoch stößt die sequentielle Datenaufnahme des terrestrischen Laserscannings bei Objektbewegungen an ihre Grenzen. Da die Aufnahmen im Forst selten unter konstanten Bedingungen durchgeführt werden können, muss immer mit einer Bewegung der Krone gerechnet werden, was zu verzerrten 3D-Darstellungen führt. Ebenfalls sind regelmäßige Baumanordnungen, wie sie in Plantagen vorzufinden sind, aufgrund des extremen Einflusses von Verdeckung eher weniger geeignet. Durch mehrmaliges Aufstellen könnte dem entgegengewirkt werden. Andererseits können aufgrund der Regelmäßigkeit der Baumpositionen Abschattungen exakt vorausgesagt und modellierbar gemacht werden. Hinsichtlich der vertikalen Vegetationsstruktur beeinflussen Plenterwälder und mehrschichtige Bestände die Baumhöhenbestimmung sowie die Segmentierung im Voxelraum.

7.2 Registrierung von terrestrischen Laserscannerdaten

Die vorgestellten Methoden aus den vorangegangenen Abschnitten wurden anhand der Daten des Fichtenbestandes getestet und validiert. Dabei bilden zwei Laserscans (Abbildung 7.19) am Fuße des Hauptturmes die Validierungsgrundlage, die im Folgenden als Scan 1 und Scan 2 bezeichnet werden. Die Scans wurden mit dem Faro LS 880 mit einem Abstand von knapp 12 m aufgenommen. Im Testgebiet wurden insgesamt neun Verknüpfungspunkte (Kreuze) räumlich verteilt, die sich in der Höhe auf einen Bereich von knapp 10 m erstrecken.

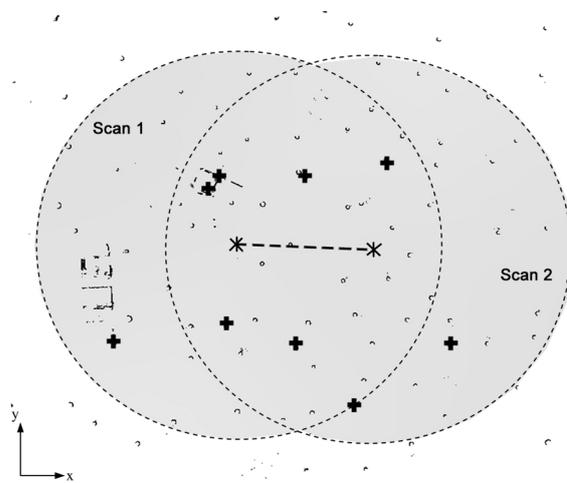


Abbildung 7.19: Plotkonfiguration von Scan 1 und Scan 2 mit eingezeichnetem Plotradius von 18 m, überlagert mit einer Punktwolkschicht in 1,80 m Höhe über dem Gelände (Kreuze – Verknüpfungspunkte, Sterne – Scannerstandpunkte, gestrichelte Linie – Basis) (Bienert & Maas, 2009).

7.2.1 Manuelle Kugeldetektion und Registrierung

Die manuelle Registrierung der Scandaten, die als Referenz in die spätere Analyse mit eingeht, wurde in dem Programm *Faro Scene* verwirklicht. Die selektierten Kugeln haben aufgrund der Entfernungen zum Scanner und der Scanauflösung unterschiedliche Punktzahlen, die zur Bestimmung der Mittelpunkte verwendet werden. Die Punktzahlen für Scan 1 liegen zwischen $12 \leq n_i \leq 209$ und für Scan 2 zwischen $14 \leq n_i \leq 102$. Die Standardabweichungen der Mittelpunkte liegen im Scan 1 zwischen $1,0 \text{ mm} \leq \hat{\sigma}_{XYZ} \leq 5,1 \text{ mm}$ und im Scan 2 zwischen $1,1 \text{ mm} \leq \hat{\sigma}_{XYZ} \leq 6,1 \text{ mm}$.

Insgesamt wurden zwei Registrierungen mit unterschiedlichen Kugelanzahlen getestet. Die Punktzuordnung wurde über ein Distanzmuster gelöst. Die erste Registrierung (*manuell 1*) fand mit allen Kugeln statt, die im Scangebiet verteilt wurden. Die Kugeln waren somit nicht nur in der Lage, sondern auch in der Höhe, mit knapp 10 m Höhendifferenz zwischen höchster und niedrigster Kugel, gut verteilt. Die zweite Registrierung (*manuell 2*) wurde mit vier Kugeln durchgeführt. Diese Kugelkonfiguration entspricht der Minimalkonfiguration mit einer Überbestimmung und kommt der Punktverteilung im Forst am nächsten, da die Kugeln auf dem Boden verteilt waren und nur eine Höhendifferenz von 0,84 m aufwiesen. Im Vergleich zu der ersten Registrierung mit allen Kugeln ($\hat{\sigma}_0 = 4,6 \text{ mm}$) wurde hier eine Registrierungsgenauigkeit von $\hat{\sigma}_0 = 2,3 \text{ mm}$ erreicht. Die Transformationsparameter sind in Tabelle 15 im Abschnitt 7.2.4 den Ergebnissen der weiteren Registrierungsmethoden vergleichend gegenübergestellt.

7.2.2 Automatische Kugeldetektion

Die automatische Kugeldetektion wurde ebenfalls an Scan 1 und Scan 2 getestet. Bevor das invertierte Binärbild erstellt wurde, wurden zunächst die Intensitäten der Kugeln analysiert, um den Schwellwert festzulegen. Dies geschah in der Software *Faro Scene*, indem die Kugeln manuell selektiert wurden und kugelweise ein Intensitätshistogramm aufgestellt wurde. Die Intensitätsanalyse ergab, dass 62 % aller Kugelpunkte eine Intensität mit einem Grauwert größer 242 besitzen. Um das Maximum an Kugelpunkten und ein Minimum an anderen Objektpunkten zu erhalten, wurde als Schwellwert $g_{\max} = 242$ gewählt und pro Scan ein invertiertes Binärbild mit einer Auflösung von 9.628×4.305 Pixel erstellt. Insgesamt 2,2 % aller Pixel in Scan 1 und 2,7 % in Scan 2 wurden nach der Schwellwertoperation als besetzte Pixel beibehalten. Nach der Erosion wurden diese Anteile erwartungsgemäß reduziert und nur noch knapp ein Fünftel der Pixel (Scan 1: 0,48 %; Scan 2: 0,39 %) blieb als potentielle Kugelpunkte erhalten. Letztendlich wurden alle Punktcluster mit einer Mindestanzahl von $n_{\min} = 20$ einem Kugelfit unterzogen und 13 Objekte in jedem Scan als potentielle Kugel erkannt. Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse der Kugeldetektion mit maximal zwei nicht detektierten Kugeln in Scan 2 (Fehler 1. Art). Fehler 2. Art sind Fehldetektionen, bei denen intensitätsstarke Stamm- oder Bodenpunkte im Kugelfit ein zufriedenstellendes $\hat{\sigma}_0$ erreicht haben.

Tabelle 13: Ergebnisse der automatischen Kugeldetektion mit $n_{\min} = 20$ (erweiterte Tabelle aus Bienert & Maas (2009)).

	Scan 1	Scan 2
Pixel nach Schwellwertoperation	2,20 %	2,70 %
Pixel nach Erosion	0,48 %	0,39 %
Anzahl sichtbare Kugeln	9	9
Anzahl detektierte Kugeln	13	13
Korrekt detektierte Kugeln	8	7
Fehler 1. Art	1	2
Fehler 2. Art	5	6

Tabelle 14 zeigt die detektierten Kugeln mit Abstand zum Scanner, die Punktzahl und die Standardabweichung der Kugelmittelpunkte. Es wird ersichtlich, dass Kugeln ab 20 m Entfernung zum Scanner nicht mehr erfolgreich detektiert werden. Beeinflusst wird dies durch ein Zusammenspiel folgender Faktoren:

- Minimumpunktzahl $n_{min} > 20$,
- Schwellwert $g_{max} = 242$
- Kugelentfernung in Abhängigkeit von der verwendeten Scanauflösung.

Demnach hat eine Erhöhung von n_{min} und der Scanauflösung sowie ein Herabsetzen des Schwellwertes zur Folge, dass mehr Punkte auf der Kugeloberfläche vorhanden sind und auch entferntere Kugeln detektiert werden können.

Tabelle 14: Parameter der automatisch detektierten Kugeln (n.d. - nicht detektierbar)(Bienert & Maas, 2009).

Kugel	Scan 1			Scan 2		
	d_1 [m]	n_i	$\hat{\sigma}_{XYZ}$ [mm]	d_2 [m]	n_i	$\hat{\sigma}_{XYZ}$ [mm]
1	20,90	n. d.	n. d.	11,01	136	0,6
2	18,02	24	3,8	14,54	55	1,3
3	10,99	163	0,8	11,39	126	0,8
4	7,69	326	0,6	14,81	n. d.	n. d.
5	14,07	48	2,8	24,43	n. d.	n. d.
6	6,89	540	0,5	15,93	27	3,1
7	10,26	275	0,7	17,56	21	3,0
8	8,81	227	1,0	9,07	253	0,4
9	15,53	24	5,5	8,53	273	0,4
Mittel	12,57	203,38	2,0	14,15	127	1,4

7.2.3 Registrierung über BHD

Von den 46 Bäumen aus Scan 1 und den 49 Bäumen aus Scan 2 wurden die Mittelpunkte der BHD mit dem in Abschnitt 5.4.3.1 beschriebenen Verfahren extrahiert. Letztendlich konnten mit RANSAC 32 homologe BHD einander zugeordnet werden, über die eine Registrierung mit einer Standardabweichung $\hat{\sigma}_o = 5,13$ cm durchgeführt wurde. In einem zweiten Schritt wurden die registrierten Daten über das ICP neu ausgerichtet und verbessert. Dazu wurden vier horizontale Schichten in 8 m, 10 m, 12 m, 14 m über dem DGM mit einer Höhe von 40 cm extrahiert und in Cluster mit einer Mindestpunktzahl n_{min} von 30 Punkten separiert. Alle Cluster, die einen Konvergenzwinkel der Aufnahmerichtungen zu den Clusterschwerpunkten kleiner 50° hatten, sind als Input in die ICP-Berechnung eingeflossen. Über insgesamt 95 homologe Stammsegmente, verteilt über vier Schnitte, wurde die Neuausrichtung durchgeführt. Sind in den Stammabschnitten Äste enthalten, führt dies zusätzlich zu einer Korrektur in der Höhe. Dies stellt eine Verbesserung der Registrierung dar, ist aber dennoch nicht mit den erreichten Ergebnissen diskreter VP zu vergleichen. Abbildung 7.20 stellt die ICP-Registrierung der Registrierung über BHD und über sechs VP gegenüber.

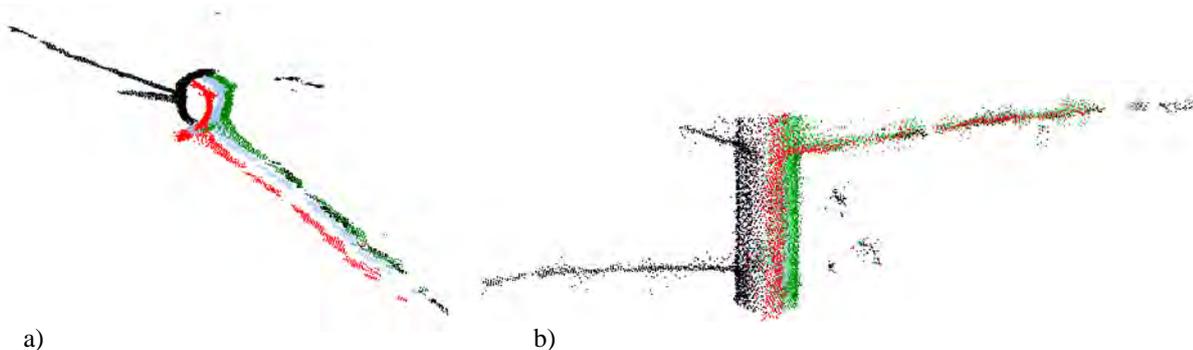


Abbildung 7.20: ICP-Registrierungsergebnis (hellblau) im Vergleich zur Registrierung über BHD (rot) und über sechs VP (grün).

7.2.4 Registrierungsverfahren im Vergleich

Das in Abschnitt 6.1.1.3.4 vorgestellte Registrierprogramm wurde angewendet, um mit den VP der verschiedenen Verfahren eine automatische Zuordnung durchzuführen und Transformationsparameter zu bestimmen. In der Tabelle 15 sind zwei Registrierungen dargestellt, deren Kugelmittelpunkte durch manuelles Markieren der Laserscannerpunkte erzeugt wurden. Sie unterscheiden sich in der Kugelanzahl und der Verteilung in der Höhe. Während die neun Kugeln der manuellen Registrierung 1 eine Höhendifferenz von knapp 10 m aufweisen, wurde bei dem zweiten Test (manuell 2) mit 4 Kugeln nur eine Verteilung in der Höhe von 84 cm erreicht. Des Weiteren ist das Ergebnis der automatischen Kugeldetektion mit anschließender Registrierung über sechs homologe Punkte dargestellt, ebenso die Transformation der Punktwolken über 32 extrahierte, korrespondierende BHD. Die beiden letzten Spalten enthalten die Ergebnisse der Registrierung unter Zuhilfenahme der Baumachsen. Dabei unterscheidet sich die erste Methode von der zweiten durch die Aufstellung der Ebenen (Baumachse 1 = mittlere Baumachse; Baumachse 2 = Punkt auf der Baumachse und lotrechte Achse im VP).

Die Punktzuordnung erfolgte für die Methoden *manuell 1*, *manuell 2* und *automatisch* über Distanzmuster mit einer maximal zulässigen Streckentoleranz von 10 cm. Die restlichen Methoden wurden aufgrund der relativ hohen Punktzahl von 54 Bäumen in Scan 1 und 48 Bäumen in Scan 2 mit RANSAC mit einer zulässigen 3D-Streckentoleranz von 20 cm zugeordnet. Generell lässt sich sagen, dass mit allen vorgestellten Methoden eine Registrierung möglich ist, obgleich sie bei einigen auch nur eine Grobregistrierung darstellt.

Tabelle 15: Registrierungsverfahren im Vergleich; Maßstab $m = 1$ (erweiterte Tabelle aus Bienert & Maas (2009)).

Methode	manuell 1	manuell 2	automatisch	BHD	Baumachse 1 (Achse)	Baumachse 2 (MP)	
Punktzuordnung	Distanzmuster			RANSAC			
Anzahl VP	9	4	6	32	31	31	
Translation	X [m]	11,501	11,503	11,504	11,503	11,493	11,499
	$\hat{\sigma}_x$ [cm]	0,16	0,12	0,22	0,94	0,46	0,32
	Y [m]	-3,480	-3,480	-3,479	-3,484	-3,472	-3,470
	$\hat{\sigma}_y$ [cm]	0,18	0,14	0,24	1,04	0,84	0,58
	Z [m]	-0,819	-0,816	-0,821	-0,786	-0,797	-0,805
$\hat{\sigma}_z$ [cm]	0,21	0,24	0,29	1,22	1,11	0,76	
Rotation	ω [°]	0,0509	-0,0179	0,0344	0,1684	-0,0054	0,0000
	$\hat{\sigma}_\omega$ ["]	0,31	0,29	0,44	2,1	1,18	0,81
	φ [°]	0,0739	0,0392	0,0969	-0,2658	0,0066	0,0000
	$\hat{\sigma}_\varphi$ ["]	0,30	0,67	0,53	2,42	1,01	0,69
	κ [°]	-56,8950	-56,8970	-56,8950	-56,8977	-56,8704	-56,8783
	$\hat{\sigma}_\kappa$ ["]	0,20	0,20	0,31	1,39	0,67	0,46
$\hat{\sigma}_0$ [cm]	0,46	0,23	0,49	5,13	1,71	1,17	

Die Abbildung 7.21 zeigt ein Stammprofil in 14 m Höhe, das mit den verschiedenen Registrierungsverfahren ausgerichtet wurde. Bei dem Baum handelt es sich um eine Fichte, die in einem Abstand von ca. 4,8 m vom ersten Standpunkt und 7,2 m vom zweiten Standpunkt entfernt stand. Schwarz sind die aufgenommenen Punkte von Standpunkt 1 und jeweils in einer anderen Farbe die transformierten Punkte des zweiten Standpunktes. Der Abbildung 7.21 sowie auch der Tabelle 15 ist zu entnehmen, dass die Registrierung über die BHD mit einer Standardabweichung von 5,13 cm das schlechteste Ergebnis bringt. Die besten Ergebnisse werden mit den Methoden *manuell 1*, *manuell 2* und *automatisch* erzielt. Ebenfalls wird deutlich, dass die Transformation über die Methoden *Baumachse 1* und *Baumachse 2* in der Lage eine Verschiebung in Richtung Baumachse aufweisen. Eine detaillierte Ansicht der Stammprofile, getrennt nach Methoden, kann dem Anhang A.5 entnommen werden.

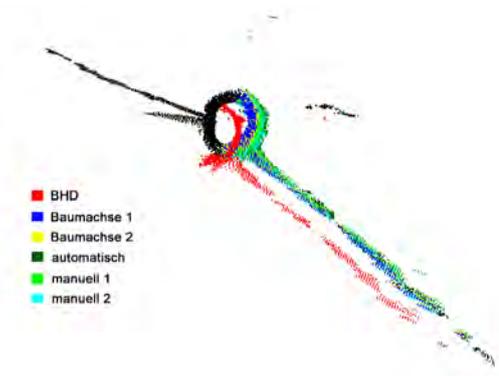


Abbildung 7.21: Kombinierte Darstellung der Registrierungen am Beispiel eines Stammquerschnittes. Schwarz sind die Punkte von Scan 1 und farbig die transformierten Punkte von Scan 2.

7.2.5 Diskussion

Die vorgestellten Registrierungsverfahren führten mit dem verwendeten Testdatensatz zu erfolgreichen Registrierungen unterschiedlicher Genauigkeiten. Prinzipiell ist die Verwendung künstlicher diskreter VP am genauesten, da zum einen der Nutzer beim Verteilen der VP Einfluss auf die Punktanzahl hat und zum anderen durch robuste Extraktionsmethoden gleiche diskrete Punkte bestimmt werden (Kugelmittelpunkte).

Im Vergleich zu den künstlichen VP sind die extrahierten VP aus der Punktwolke (BHD) in der Anzahl deutlich höher, dafür aber in der Lagegenauigkeit aufgrund unterschiedlicher Blickrichtungen und natürlicher Stammoberflächen ungenau. Hinzu kommt, dass die Punktanzahl nicht beeinflussbar ist, d. h. bei ebenem Gelände liegen die extrahierten BHD alle in einer Ebene. Allerdings werden durch die deutliche Überbestimmung Registerergebnisse erreicht, die für Forstzwecke ausreichend sind.

Die manuelle und automatische Registrierung unterscheidet sich in der Bestimmung der Mittelpunkte der VP. Während die manuelle Methode subjektiv durch das Handeln des Operators das Ergebnis beeinflusst, ist eine automatische Detektion von künstlichen Verknüpfungspunkten objektiv. Zusätzlich führt die Automatisierung zur Zeitersparnis. Eine Analyse hat ergeben, dass bei der automatischen Kugeldetektion im Mittel 1,8-mal mehr Punkte zur Ausgleichung verwendet werden als bei manuell selektierten Punkten des gleichen Datensatzes. Andererseits arbeitet der Automatisierungsprozess mit fest vorgegebenen Parametern, sodass eine Kugeldetektion ab 20 m aufgrund einer zu geringen Mindestpunktanzahl nicht mehr zulässig ist. Im manuellen Markierungsprozess dagegen entscheidet der Operator, welches Objekt noch zu einer Kugel gehört. Beide Methoden zählen zu den genauesten Verfahren und führen sofort zu einer Feinregistrierung mit hohen Genauigkeiten.

Die Registrierungsverfahren über extrahierte Punkte aus den vorliegenden Punktwolken verwenden Stammabschnitte. Da der Baum einem natürlichen Wachstumsprozess unterliegt, können Inhomogenitäten im Stammverlauf (Beulen, Knoten) auftreten. Kommt dann noch eine unterschiedliche Blickrichtung auf den Stamm des zweiten Datensatzes hinzu, liegen unterschiedlich geformte Stammabschnitte zur Extraktion vor, was sich in der Lage äußert. Neben der Lage wird die Höhe durch den Baumfußpunkt unter Berücksichtigung der Geländeneigung festgelegt. Auch hier sind Höhenabweichungen möglich. Ist zum Beispiel eine Geländeinhomogenität vorhanden, die aufgrund der Single-Scan-Aufnahme in den beiden Datensätzen unterschiedlich sichtbar ist und berücksichtigt wird, kommt es zu einem Höhenunterschied in der Fußpunktbestimmung. Zusätzlich ist die Punktverteilung äußerst ungünstig. Die extrahierten VP liegen nahezu in einer Ebene. Fehler in der Lage werden durch die Überbestimmung der Punkte kompensiert, während Abweichungen in der Höhe ω und φ beeinflussen. Gerade in den oberen Stammabschnitten und in den entfernteren Bereichen haben Ungenauigkeiten von ω und φ die größten Auswirkungen. Die Methode der BHD-Registrierung bedarf allerdings noch einer Korrektur in Form einer Feinregistrierung mit ICP.

7.3 Kombination von terrestrischen Laserscannerdaten und Flugzeuglaserscannerdaten

Für die Studiengebiete im Tharandter Wald lagen ALS-Daten einer Befliegung aus dem Jahr 2006 vor. Diese wurden mit den Daten des Fichtenbestandes und den Methoden aus Abschnitt 6.2 registriert. Zunächst wurden die TLS-Daten der Bodenscans mit den ALS-Daten registriert. In einem weiteren Experiment wurde die Verwendbarkeit des Verfahrens zur Registrierung von Hochstandpunkten (Turmlaserscans) mit den Bodenaufnahmen untersucht. Da die Registrierungsparameter vom Turm und von den Bodenscans über Passpunkte bekannt sind und auch die Aufnahme mit einem terrestrischen Laserscanner über den Baumkronen von einem Turm im Praxisgebrauch eher unüblich ist, wird dieser Datensatz dennoch verwendet, um unter kontrollierten Bedingungen das Verfahren zu validieren.

7.3.1 Baumdetektion

Bei den beiden vorgestellten Verfahren aus Abschnitt 6.2.2 lieferte die Methode mit der erweiterten Maximumsuche die zuverlässigeren Ergebnisse. Die Wasserscheidentransformation des Kronenmodells der ALS-Daten lieferte kein zufriedenstellendes Ergebnis. Dennoch wird anhand des nDKM der terrestrischen Turmlaserscans des Testdatensatzes die WST sowie eine markerbasierte WST angewendet, um die Erfolgsquote bei einem ausreichend dichten Kronenmodell zu demonstrieren. Die Ergebnisse der Baumdetektion mit der lokalen Maximasuche im zweiten Teil des Abschnittes entstammen dem ALS-Datensatz.

7.3.1.1 Wasserscheidentransformation

Das generierte nDKM der Turmlaserscans enthält Vegetation ab 10 m Höhe. Es hat eine Rasterweite von 10 cm und deckt einen Bereich von 40 m x 27 m ab. Insgesamt stehen 28 Fichten auf dieser Probestfläche. Dem Ergebnis in Abbildung 7.22 liegt eine sechsfache Glättung mit einem Gauß-Filter (Kernel: 7x7 Pixel) zugrunde. Um das Segmentierungsergebnis zu visualisieren, wurden die Segmente mit einer horizontalen Schicht des Stammraumes (3 m über Boden mit einer Schichthöhe von 20 cm) überlagert. Grün eingefärbt sind die Segmente, die genau einen Baum enthalten, und rot sind die fehlerhaften Segmente eingefärbt. Von den 28 Fichten wurden 23 Bäume (82 %) richtig segmentiert, vier Segmente enthielten mehrere bzw. keine Bäume. Ein Blick auf die Seitenansicht des 3D-Kronenmodells zeigt, dass aufgrund des horizontalen Auslegers an der Turmspitze (zur Befestigung von Messinstrumenten) ein Scanschatten im Bereich des Turmes verursacht wird, sodass drei Baumkronen komplett abgeschattet wurden. Ohne diese Abschattung würden vermutlich alle Bäume richtig segmentiert werden.

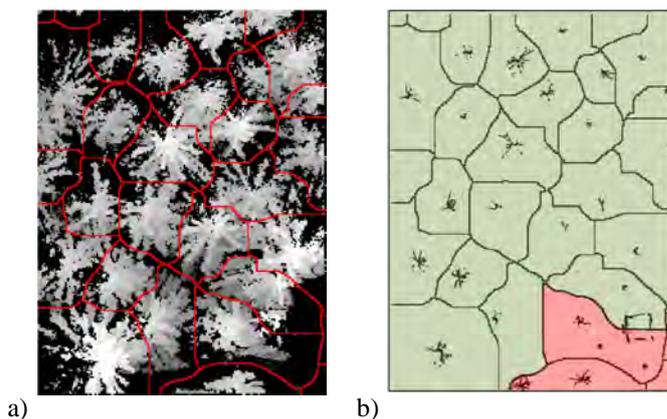


Abbildung 7.22: a) Ergebnis der Wasserscheidentransformation des nDKM aus TLS-Daten; b) Kombinierte Ansicht einer Punktwolkschicht von 20 cm Höhe des Stammraumes in 3 m über dem Gelände mit den klassifizierten Wasserscheidensegmenten (grün – richtig segmentiert, rot – Fehlsegmentierung).

Ein Beispiel der markerbasierten WST des gleichen nDKM ist in Abbildung 7.23 zu sehen. Der Suchradius zum Detektieren der Marker aus der Punktwolke wurde auf 4 m festgesetzt. Ausgehend von jedem gefundenen Marker wird in der WST ein Segment gebildet. Ein zu großer Suchradius hat zur Folge, dass einer von zwei eng beieinander stehenden Bäume nicht detektiert wird. In diesem Beispiel konnten nur 14 Fichten (50 %) richtig segmentiert werden.

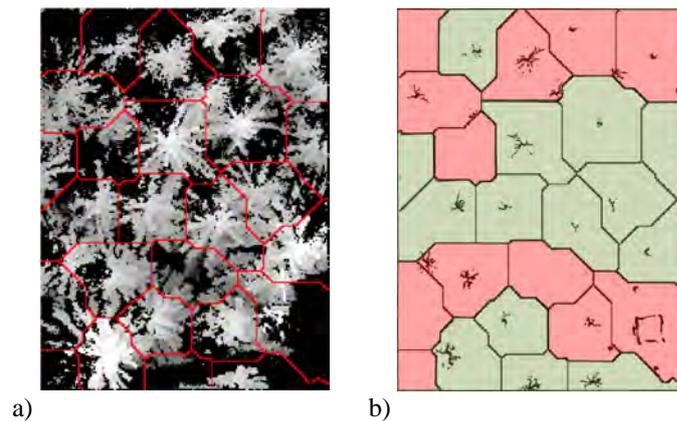


Abbildung 7.23: a) Ergebnis der markerbasierten Wasserscheidentransformation des nDKM aus TLS-Daten; b) Kombinierte Ansicht einer Punktwolkschicht von 20 cm Höhe in 3 m über dem Gelände mit den klassifizierten Wasserscheidensegmenten (grün – richtig segmentiert, rot – Fehlsegmentierung).

7.3.1.2 Erweiterte lokale Maximasuche mit Filterung

Für einen 360 m x 460 m großen Bereich, der den Fichtenbestand beinhaltet, wurde die lokale Maximasuche mit einem 3x3 Pixel großen Strukturelement durchgeführt (Abbildung 7.24). Das verwendete nDKM hatte einen Rasterabstand von 20 cm. Im Anschluss daran wurden die Daten mit einem Median und einem Gauß-Filter geglättet. Abbildung 7.24 zeigt das normierte DKM ab einer Vegetationshöhe von 10 m und die detektierten Baumpositionen (schwarze Punkte).

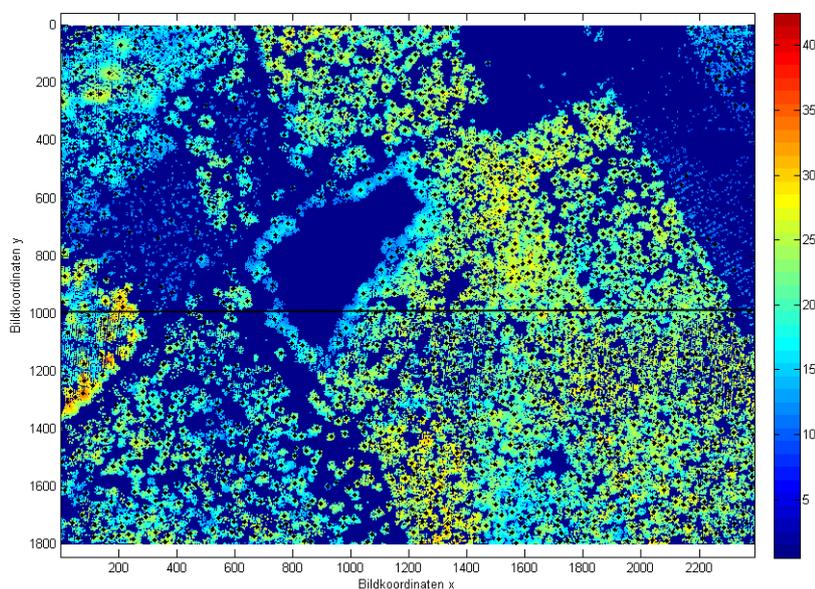


Abbildung 7.24: nDKM der ALS-Daten ab einer Vegetationshöhe von 10 m mit den detektierten Baumpositionen (schwarze Punkte), Höhenskala in m (Bienert et al., 2011).

Anhand eines horizontalen Profils an der Bildkoordinatenposition $y = 1.000$ wird der Effekt der Glättung in Abbildung 7.25 visualisiert. Der Suchradius zum Eliminieren mehrerer Maxima innerhalb eines Umkreises wurde auf $r_{\text{Nachbar}} = 1,5$ m gesetzt. Mit dieser Methode wurden letztendlich 1.403 Bäume automatisch detektiert.

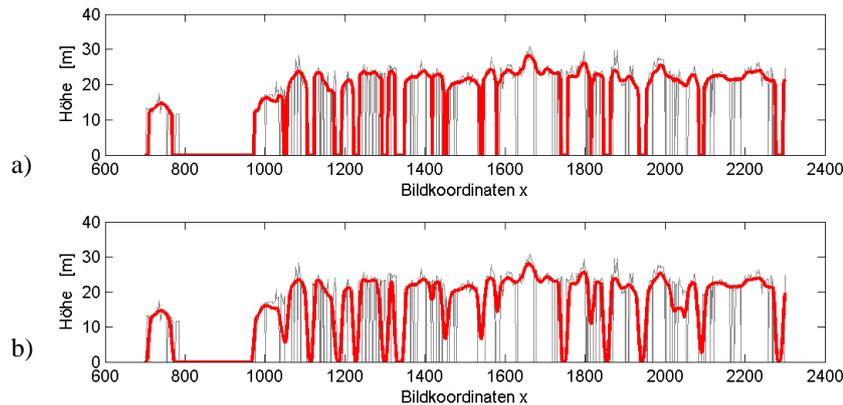


Abbildung 7.25: 20 cm breites Profil des nDKM an Position $y = 1.000$ (vgl. Abbildung 7.24). Die grauen Linien bilden die ungefilterten Rohdaten ab. Rot ist der gefilterte Verlauf des nDKM: mit a) Median-Filterung, b) Median- und Gauß-Filterung.

7.3.2 Registrierung TLS mit ALS

Über die Detektionsmethode in terrestrischen Punktwolkschichten (vgl. Abschnitt 5.3.2) wurden für den Fichtenbestand 358 Bäume automatisch detektiert. Aus den ALS-Daten liegen ebenfalls 1.403 detektierte Bäume vor. Letztendlich wurde der Bereich um die Lichtung ausgewählt. Die detektierten Bäume aus der Flugzeugaufnahme wurden auf 226 Bäume und die aus den TLS-Daten auf 172 Bäume begrenzt und auf das DGM reduziert. Die homologe Punktzuordnung geschah über RANSAC, wobei 85 der Baumpaare nach einer erfolgreichen Konfiguration von drei zufälligen Punkten das Kriterium der maximalen 3D-Streckendifferenz von 2,5 m erfüllten. Mit den 85 Baumpaaren wurde eine Transformation durchgeführt, aber letztendlich wurden nur die Baumpaare ausgewählt, die das Kriterium der halben 3D-Streckendifferenz erfüllten (1,25 m). Somit verblieben nur noch 59 homologe Baumpaare (entspricht 34 % der Bäume aus den TLS-Daten), die zu einer Standardabweichung von $\hat{\sigma}_0 = 0,49$ m führten. Mit dem Programm *Geomagic* (Version: 10 SR1) wurden über einen ICP-Algorithmus die zuvor klassifizierten Bodenpunkte im Umkreis der Laserscannerstandpunkte neu ausgerichtet und die endgültigen Transformationsparameter zur Korrektur der TLS-Daten verwendet. Die klassifizierten Bodenpunkte der TLS-Daten liegen im Mittel um 21 cm über dem Gelände der ALS-Daten. Werden nur die Bodenpunkte im Umkreis der Scannerstandpunkte verwendet, treten Abweichungen von 3 mm auf. Mit zunehmender Entfernung wird der Auftreffwinkel am Boden immer spitzer und vorhandene Bodenvegetation erschwert die Reflexion an der Geländeoberfläche.

Zur Validierung der Registrierungs Genauigkeit wurden die transformierten TLS-Daten mit den ALS-Daten von einem Imkerhäuschen auf der Lichtung analysiert und visualisiert (Abbildung 7.26). Dieses Haus hat eine Größe von 9 m x 7 m x 3,4 m (L x B x H). Nach der Grobregistrierung wurden für mehrere Punkte im Bereich des Daches Maße abgegriffen und die Mittelwerte bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass durch Anwendung des ICP-Algorithmus die Genauigkeit in Abhängigkeit von der Grobregistrierung gesteigert werden konnte.

Tabelle 16: Vergleich der Grob- und Feinregistrierung anhand abgegriffener Punkte am Imkerhäuschen. Die Werte entsprechen den Mittelwerten von sieben Punkten am Dach.

	Lage [m]	Höhe [m] mit σ_0
Grobregistrierung	0,400	-0,380 ± 0,207
Feinregistrierung	0,250	-0,003 ± 0,082

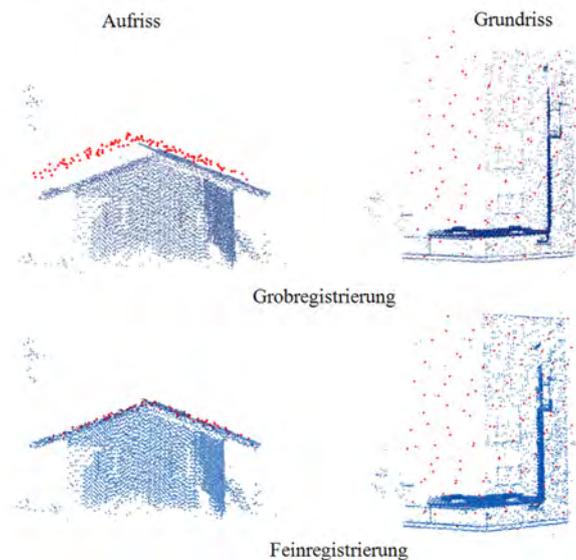


Abbildung 7.26: Kombinierte Ansicht der registrierten TLS- und ALS-Punktwolken am Beispiel des Imkerhäuschens auf der Lichtung (rot – ALS, blau – TLS). Dargestellt ist jeweils der Auf- und Grundriss der Grobregistrierung (oben) und der Feinregistrierung (unten) (entnommen aus Bienert et al. (2011), in Anlehnung an Pech (2010)).

7.3.3 Registrierung von Hochstandpunkten

Das in Abschnitt 6.2 vorgestellte Verfahren der ALS- und TLS-Datenregistrierung wurde zur Validierung anhand einer terrestrischen Laserscannerpunktwolke von einem Hochstandpunkt und von einer Bodenaufnahme getestet. Die Turmaufnahme vom 42 m hohen Turm erwies sich dazu als sehr nützlich, wobei allerdings diese Aufnahmeposition im Forst nicht der Realität entspricht und bodennahe Standpunkte der Normalfall sind. Auf die Turmaufnahmen wurde das Verfahren der Baumspitzendetektion (Abbildung 7.27) über die erweiterte lokale Maximasuche (vgl. Abschnitt 6.2.2.2) angewendet.

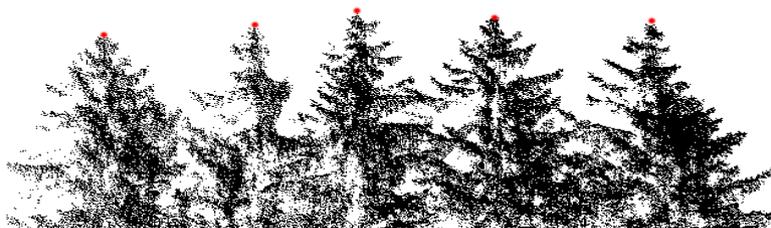


Abbildung 7.27: Automatisch detektierte Baumspitzen im TLS-Datensatz der Turmaufnahme.

Letztendlich wurden aus den 193 erfolgreich detektierten Baumspitzen der Turmaufnahme und den 172 Baummittelpunkten der Bodenaufnahme mittels RANSAC 37 homologe Baumpaare zugeordnet, die maximal eine 2D-Streckendifferenz von 0,5 m aufwiesen. Über die Grobregistrierung wurde die Turmaufnahme in das System der Bodenaufnahme mit einer Standardabweichung von 0,20 m registriert. Wie der Gegenüberstellung der Transformationsparameter in Tabelle 17 zu entnehmen ist, tritt nach der Durchführung der Feinregistrierung (mit ICP) eine deutliche Genauigkeitssteigerung auf. Zur Validierung der Ergebnisse sind die Transformationsparameter der Registrierung über homologe Verknüpfungspunkte in der Tabelle ebenfalls aufgeführt. Die Turmaufnahmen wurden aufgrund von Sichtbehinderung durch das dichte Kronendach ursprünglich nur über vier Verknüpfungspunkte (retro-

reflektierende Zylinder) registriert, was für die Bestimmung von Parametern ausreicht. Allerdings erzielt eine Überbestimmung von deutlich mehr als drei Verknüpfungspunkten eine Genauigkeitssteigerung.

Eine weitere Möglichkeit ist eine Registrierung, bei der die Verknüpfungspunkte sowie auch die homologen Baumpositionen eingehen. Den Baumpositionen wird dabei aufgrund der unterschiedlichen Definitionen der Baumpositionen am Baum (unterer Stammbereich und Baumspitze) ein geringes Gewicht bei der Bestimmung der Transformationsparameter eingeräumt. Letztendlich wurden neben den vier Verknüpfungspunkten sechs weitere Baumpositionen, die nach erfolgreicher Punktzuordnung eine maximale 3D-Streckendifferenz von 0,3 m aufwiesen, für die Transformation verwendet. Die Verknüpfungspunkte gingen mit einem Gewicht von 1 und die Baumpositionen mit einem Gewicht von 0,001 in die Berechnung ein und führten zu einer Genauigkeitssteigerung im Vergleich zu der Registrierung, bei der nur Verknüpfungspunkte Berücksichtigung fanden.

Tabelle 17: Gegenüberstellung der Transformationsparameter der Registrierung mit Verknüpfungspunkten (Zylinder), über Baumpositionen und kombiniert.

		Baumpositionen			
		Verknüpfungspunkte	Grobregistrierung	Feinregistrierung (zusätzlich)	Verknüpfungspunkte mit Baumpositionen
Anzahl homologer Punkte		4	37	-	4 + 6
Standardabweichung [m]		0,004	0,200	0,072 (Lage)	0,003
Translation	X [m]	36,142	36,325	36,131	36,144
	Y [m]	11,477	11,386	11,391	11,477
	Z [m]	39,628	39,444	39,608	39,630
Rotation	ω [°]	0,5921	0,6081	0,6079	0,5910
	φ [°]	-0,8142	-0,7800	-0,7836	-0,8180
	κ [°]	123,6012	123,6100	123,6100	123,6000

7.3.4 Inventurparameter aus kombinierten TLS- und ALS-Daten

Die Datenfusion der erfolgreich registrierten Datensätze ermöglicht, dass Inventurparameter, insbesondere die Baumhöhen, genauer bestimmt werden können. Verdeckungen im Kronenraum bei terrestrischen Laserscans können durch ALS-Daten kompensiert werden. Es werden eher Verbesserungen in der Baumhöhenbestimmung sowie in einigen Kronenparametern als in den übrigen Baumparametern erwartet. Voraussetzung ist allerdings eine Synchronisation der Aufnahmezeitpunkte. Zumindest sollte sichergestellt werden, dass nicht allzu große Wachstumsperioden zwischen den Aufnahmen liegen und die Daten somit unterschiedliche Vegetationshöhen repräsentieren.

Für einen Bereich im Fichtenbestand mit 26 Bäumen nahe dem Hauptturm, wurde der Einfluss der kombinierten Punktwolken hinsichtlich der Ableitung der Brusthöhendurchmesser, der Baumhöhen sowie der Baumfußpunkte untersucht. Für das Stichprobengebiet mit einem Radius von 30 m werden vier verschiedene Datenkombinationen unterschieden, die im Folgenden als *Varianten* bezeichnet werden (Abbildung 7.28):

- (1) TLS-Aufnahme vom Boden
- (2) ALS-Aufnahme aus der Luft
- (3) kombinierte TLS- und ALS-Aufnahme mit interpoliertem DGM aus ALS-Daten (Raster 0,2 m)
- (4) TLS-Aufnahme vom Boden sowie vom Turm (Hochstandpunkt) mit interpoliertem DGM aus ALS-Daten (Raster 0,2 m).

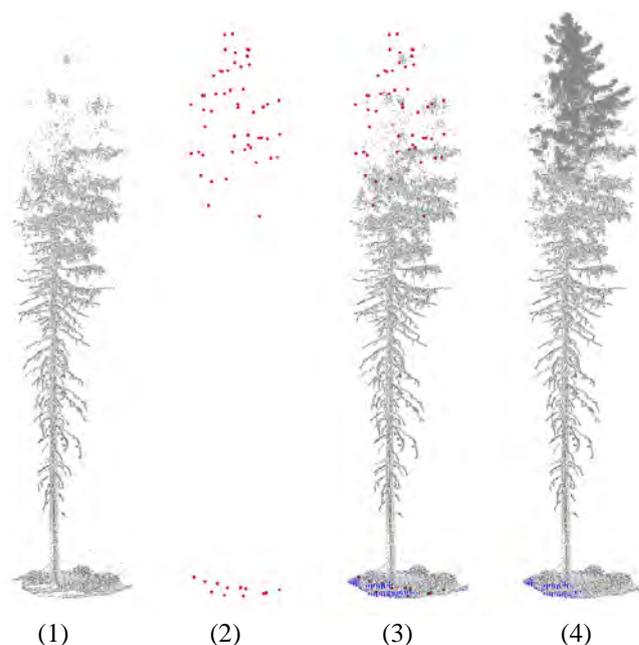


Abbildung 7.28: Mögliche Datenkombinationen der TLS- und ALS-Aufnahme des Fichtenbestandes, visualisiert am Beispiel einer Fichte; Variante (1): TLS-Daten; Variante (2): ALS-Daten; Variante (3): TLS- und ALS-Daten mit ALS-DGM; Variante (4): TLS-Daten vom Boden und vom Turm mit ALS-DGM (modifizierte Abbildung in Anlehnung an Pech (2010)).

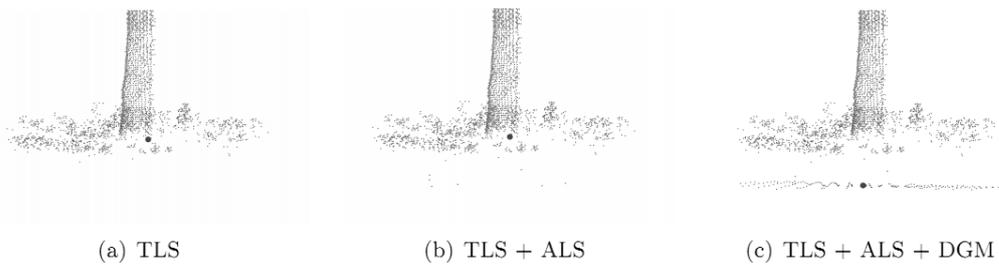
Die Datensätze, bei denen TLS-Daten beteiligt sind, wurden mit dem in Abschnitt 5.9 vorgestellten Programm automatisch prozessiert und Baumparameter abgeleitet. Bei Datenkombinationen mit interpoliertem ALS-DGM wurde anstatt des TLS-DGM das ALS-DGM verwendet. Dazu wurde das verwendete Programm erweitert, sodass ein Importieren extern generierter DGM-Punkte möglich war.

Bei der ALS-Aufnahme wurde nur die Baumhöhe mittels Differenzverfahren des höchsten und niedrigsten Punktes abgeleitet. Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus der Diplomarbeit von Pech (2010). Für umfangreichere Tests und Auswertungen zu den Inventurparametern wird auf Pech (2010) verwiesen.

7.3.4.1 Baumfußpunkt- und Brusthöhendurchmesserbestimmung

Die Analyse der Ergebnisse hat ergeben, dass hinsichtlich der BHD-Bestimmung das Hinzuziehen der ALS-Daten keine Verbesserung bringt. Aufgrund der nahezu senkrechten Blickrichtung beim Flugzeuglaserscanning entstehen kaum weitere Reflexionen am Stamm.

Allerdings beeinflussen die DGM-Punkte der ALS-Aufnahme die Ableitung der BHD indirekt. Bei vom TLS-Standpunkt entfernten Bäumen ist aufgrund des Auftreffwinkels zum Boden mit einer schlechteren Geländerepräsentation zu rechnen. Dieser Effekt ist bereits in Abschnitt 7.3.2 erwähnt worden. Das interpolierte ALS-DGM mit einem Raster von 0,2 m vervollständigt die Bodenpunkte in Bereichen schlechter TLS-Bodenabdeckung. Somit wird der Baumfußpunkt tiefer bestimmt als in den alleinigen TLS-Daten, was indirekt auch die Höhe der BHD-Bestimmung am Stamm beeinflusst (Abbildung 7.29 a und 7.29 c). Ein tiefer liegender Baumfußpunkt bedeutet eine niedrigere BHD-Höhe am Stamm und somit einen tendenziell größeren BHD. Aus den TLS-Daten (*Variante 1*) wurde ein mittlerer BHD von 37,3 cm bestimmt. *Variante 3* (ALS+TLS+ALS-DGM) weist einen mittleren BHD von 38,8 cm und *Variante 4* (TLS von Boden und Turm + ALS-DGM) von 38,7 cm auf.



(a) TLS

(b) TLS + ALS

(c) TLS + ALS + DGM

Abbildung 7.29: Einfluss des DGM auf die Baumfußpunktbestimmung am Beispiel eines Baumstammes mit unzureichender Geländerepräsentation durch die TLS-Daten (Pech, 2010).

7.3.4.2 Baumhöhenbestimmung

Hinsichtlich der Baumhöhenbestimmung sind bei den Datenkombinationen mit ALS-Daten größere Baumhöhen (die den tatsächlichen Höhen der Bäume entsprechen) zu erwarten. Da manuelle Daten für diesen Bereich nicht vorliegen, wurde für den Datenvergleich untereinander *Variante 4* als Referenz definiert, da durch die Datenaufnahme vom Turm eine optimale Kronenabdeckung vorliegt und eine exakte Baumhöhenbestimmung angenommen wird. In Abbildung 7.30 sind in einem Streudiagramm die Baumhöhen der verschiedenen Daten dargestellt. Auf der x -Achse sind als Referenz die Baumhöhen abgetragen, die aus der TLS-Boden- sowie -Turmaufnahme mit integriertem ALS-DGM ermittelt wurden. Die y -Achse repräsentiert die Baumhöhen der unterschiedlichen Datensätze, getrennt nach Farbe. Grün sind die ermittelten Baumhöhen der reinen TLS-Bodenaufnahme (*Variante 1*), blau die reinen ALS-Daten (*Variante 2*) und rot die TLS- und ALS-Daten mit integriertem ALS-DGM (*Variante 3*) eingezeichnet.

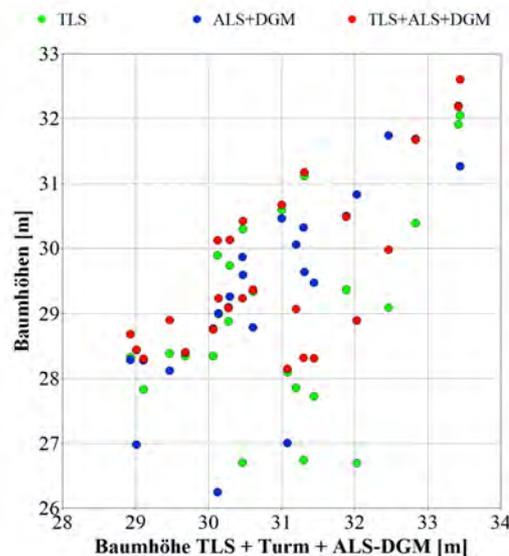


Abbildung 7.30: Streudiagramm der ermittelten Baumhöhen (modifizierte Abbildung in Anlehnung an Pech (2010)).

Wie zu erwarten war, sind die Baumhöhen der TLS-Aufnahme im Mittel um bis zu 1,86 m kleiner als die Referenzdaten (*Variante 4*). Die größte Abweichung betrug 5,33 m beim Vergleich der TLS-Daten mit den Referenzdaten. Tabelle 18 beinhaltet eine Zusammenstellung der mittleren Baumhöhen der einzelnen Datenkombinationen und deren statistische Parameter im Vergleich zu den Referenzdaten.

Tabelle 18: Zusammenstellung der kombinierten Datenauswertung, aufgelistet nach der Baumhöhe (nach Pech, 2010).

Datenkombination (Variante)	TLS (1)	ALS (2)	TLS + ALS + ALS-DGM (3)	TLS + Turm + ALS-DGM (4)
Mittlere Baumhöhe [m]	29,22	29,63	29,82	31,08
Standardabweichung [m]	1,40	0,84	0,96	-
Mittlere Abweichung [m]	1,86	1,45	1,26	-

Wie aus Tabelle 18 zu erkennen ist, sind die mittleren Baumhöhen der *Varianten 1, 2 und 3* kleiner als die Referenzdaten. Es ist zu erwähnen, dass die ALS- und TLS-Aufnahmen zeitlich zwei Jahre auseinanderliegen, in denen auf jeden Fall ein Vegetationszuwachs zu verzeichnen ist. Inwieweit dieser Zuwachs innerhalb von 2 Jahren bei knapp 2 m liegen kann, ist zu prüfen. Die Ergebnisse aus Tabelle 18 zeigen, dass:

- mit einem bodennahen TLS-Standpunkt die Kronenspitzen nicht komplett erfasst werden können;
- eine Unterabtastung der Kronenspitze durch die ALS-Daten vorliegt, da diese nur eine Punktdichte von knapp 2 Pkte/m² haben (mit großer Wahrscheinlichkeit liegt die Baumspitze zwischen zwei ALS-Punkten).

7.3.5 Diskussion

In den letzten Abschnitten wurden Ergebnisse zur Baumdetektion aus ALS- und TLS-Daten und zur geometrischen Registrierung dieser beiden Datensätze vorgestellt. Mit den gewonnenen Baumpositionen kann unter Zuhilfenahme von robusten Schätzern eine automatische Registrierung der Daten durchgeführt werden. Dies stellt eine Grundlage für eine kombinierte Auswertung dar.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die erreichten Registrierungsgenauigkeiten (0,49 m) den Anforderungen an forstwirtschaftliche Fragestellungen gerecht werden. Letztendlich konnte die Registrierungsgenauigkeit über eine Feinregistrierung mit ICP noch verbessert werden. Mit den Baumpositionen des reinen Fichtenbestands östlich der Lichtung wurde ebenfalls eine Registrierung durchgeführt. Selbst in homogenen Beständen ohne markante Lichtung oder Waldwege führt das Verfahren zu einem erfolgreichen Ergebnis.

Die erfolgreiche Datenregistrierung ermöglicht eine genauere Ableitung von Baumhöhen. Allerdings ist eine Punktdichte von mehr als 6 Pkt/m² von Vorteil, um sicherzugehen, dass die Baumkronenspitze (gerade bei Nadelbäumen) erfasst wird, sonst ist nicht unbedingt von einem Mehrwert der ALS-Daten auszugehen. Werden zukünftig Full-Waveform-Daten verwendet, ist eine Darstellung der inneren Kronenstruktur sowie des Stammes möglich, was die Ableitung und gegebenenfalls Verbesserung weiterer Parameter (speziell Kronenparameter) aus den registrierten Datensätzen erlaubt.

Da die detektierte Baumspitze bei sehr breiten und flachen Kronen nicht immer mit dem BHD-Mittelpunkt in der Lage übereinstimmt, ist eine Vorselektierung der Laub- und Nadelbaumarten auf verschiedene Weise denkbar, um fehlerbehaftete Daten mit einem geringeren Gewicht zu versehen oder gar von vornherein auszuschließen. Dies kann erfolgen a) über den Anstieg der Punkte im Kronenprofil der Laserscannerdaten oder b) auf Basis von RGB- oder NIR-Orthophotos anhand der Kronenform und -struktur oder c) dem NDVI berechnet aus dem NIR- und Rotkanal des Orthophotos.

Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Registrierung der vom Turm aufgenommenen Daten mit den terrestrischen Bodenscans über die Zuordnung der Baumspitzen zu den BHD-Mittelpunkten möglich ist und aufgrund einer dichten Kronenerfassung sogar zu besseren Registrierungsergebnissen führt als bei der Verwendung der ALS-Daten. Allerdings ist Voraussetzung, dass Laserreflexionen vom Waldboden erfasst werden. Einschränkend ist festzuhalten, dass die Geradlinigkeit der Bäume (Kronenmittelpunkt über Baumfußpunkt) und die Verwendung selektierter Bodenpunkte in der Nähe des Scannerstandpunktes das Registrierungsergebnis beeinflussen. Die Geradlinigkeit der Bäume ist ausschlaggebend für eine erfolgreiche Zuordnung der Baumpaare. Bei schiefstehenden

Bäumen weisen die detektierten Baumspitzen ein anderes Distanzmuster auf als die BHD-Mittelpunkte, was zu fehlerhaften Zuordnungen führen kann. Dem wird mit dem Distanzkriterium in RANSAC begegnet. Demnach führt ein geringes Distanzkriterium zu einer Vorselektion der grob fehlerbehafteten Punkte.

8 TLS in weiteren forstwissenschaftlichen Anwendungen

Nachdem in den beiden vorangegangenen Kapiteln hauptsächlich die Ableitung geometrischer Baumparameter zu Zwecken der forstwirtschaftlichen Datenerhebung erläutert wurde, sollen in diesem Kapitel Einsatzgebiete terrestrischer Laserscanner in forstwissenschaftlichen Anwendungen vorgestellt werden. Die beiden folgenden Unterabschnitte erläutern die Ableitung von Vegetationsstrukturen für forstmeteorologische Fragestellungen. Während die Analyse von Voxelräumen zur Strömungssimulation an Waldrandkanten sowie in und über Forstbeständen in Abschnitt 8.1 behandelt wird, befasst sich der nachfolgende Abschnitt (8.2) mit den Verformungsstrukturen an Einzelbäumen unter künstlicher und windlastsimulierter Krafteinwirkung. Bisher wurden Methoden zur Ableitung geometrischer Parameter vorgestellt, bei denen die Ableitung der Baumart unberücksichtigt blieb. Deshalb beschäftigt sich Abschnitt 8.3 mit den Methoden zur Klassifizierung der Baumart und der Qualität anhand von Texturmerkmalen aus den Laserscannerdaten.

8.1 Strömungssimulationen an Waldrandkanten

Inhomogenitäten, wie Änderungen der Bestandshöhe und Lichtungen in Waldbeständen, beeinflussen die Entstehung und die Struktur von turbulenten Windfeldern. Die Simulation hochturbulenter Strömungen erfordert eine enorme Rechenleistung. Dabei ist die Anwendung von Modellen unterschiedlicher Art notwendig. Die Parametrisierung der Vegetation erfolgt zumeist anhand idealisierter Daten (Cescatti & Marcolla, 2004). Während bisher die Verteilung der Biomasse von Untersuchungsgebieten über herkömmliche Methoden (Ableitung aus Forstkarten, Verwendung von Ergebnissen der Forstinventur) erfasst wurde, ist das terrestrische Laserscanning ein interessantes Werkzeug zur detaillierten Vegetationserfassung. Ferner sind die Vegetationsdaten als eindimensionaler, homogener (Yang et al., 2006a; Yang et al., 2006b; Finnigan et al., 2009) oder als stark generalisierter, dreidimensionaler Bestand in den numerischen Simulationsprozessen berücksichtigt worden (Bohrer, 2009). Die hochaufgelösten Vegetationsscans ermöglichen eine zuverlässigere und detailliertere Parametrisierung der Pflanzenarchitektur. Die Verwendung dieser Daten zielt auf eine genauere Modellierung der Strömungseffekte an Waldrandkanten, als natürliche Inhomogenität, ab. Da die Deposition von Spurengasen und -stoffen direkt von der Luftströmung abhängt, können bestehende Messmethoden für Flüsse und Spurengase neu bewertet und Depositionen präziser simuliert werden. Darin ist ein Beitrag zur Klimaforschung zu sehen. Aber auch die Forstwirtschaft macht sich die Kenntnis über Strömungsvorgänge in und über Waldbeständen zu Nutze. Durch den Einsatz geeigneter waldbaulicher Maßnahmen in sturmgefährdeten Gebieten wird das Sturmschadenrisiko minimiert. Durchaus denkbar ist ebenfalls die Verwendung dieser Informationen in Schadensmodellen zur Risikoabschätzung für Versicherungsgesellschaften.

Das terrestrische Laserscanning bildet mit der Vegetationsdatenerfassung die Basis der forstmeteorologischen Auswertekette. Die unorganisierten 3D-Punktwolken, wie sie beim terrestrischen Laserscanning entstehen, sind in der Regel für numerische Simulationen nicht handhabbar. Durch geeignete 3D-Datenstrukturen (Abschnitt 2.4.3) werden Gitterstrukturen auf Basis der Punktwolken aufgebaut und für numerische Simulationsprozesse nutzbar gemacht. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Ableitung von Parametern aus den Punkten einer Gitterzelle, die direkt zur Bestimmung von Pflanzenflächendichte-Verteilungen (PAD – engl. *plant surface area density*) Verwendung finden.

8.1.1 Parameter zur Beschreibung der 3D-Waldstruktur

Ein entscheidender Parameter zur Beschreibung der 3D-Waldstruktur ist der Blattflächenindex LAI. Der LAI beschreibt das Verhältnis der projizierten einseitigen Blattflächen zu einer definierten Bodenfläche und ist eine dimensionslose Größe. Ein LAI größer 1 deutet auf eine größere Blattfläche als Bodenfläche hin. Im Schnitt sind die publizierten LAI-Werte für Nadelbestände höher als die der Laubwaldbestände (Breuer et al., 2003). In geschlossenen Beständen sind Werte zwischen 4 und 16 realistisch (Kraus, 2008). Der Quotient aus LAI und der Bestandshöhe ist die Blattflächendichte (LAD – engl. *leaf area density*), welche die Gesamtheit aller Blätter innerhalb einer Volumeneinheit angibt (Kraus, 2008). Ist nicht nur die Blattfläche von Interesse, sondern auch die Verteilung der restlichen Vegetationselemente, wird die Pflanzenflächendichte (PAD) verwendet. Diese bestimmt sich analog zum LAD.

Die klassischen Bestimmungsmethoden des LAI unterteilen sich in direkte und indirekte Methoden. Einen Überblick über die Verfahren und ihre Bestimmung ist in Jonckheere et al. (2004) gegeben. Die direkte Methode bestimmt den LAI über Blattproben. Dabei werden durch Streufallen oder direktes Absammeln (destruktives Verfahren) die Blätter gewonnen. Die Bestimmung erfolgt dann über die ermittelte Blattgrundfläche mit Blattflächenmessgeräten oder über das Trockengewicht der Stichproben. Indirekte Methoden haben gegenüber den direkten Methoden den Vorteil, dass eine zerstörungsfreie Bestimmung stattfindet. Hierzu zählen u. a.:

- traditionelle **PAR-Sensoren**, die, aufgestellt im Bestand, die Messung der für die Photosynthese relevanten Strahlung durchführen;
- **hemisphärische Photographien**, aus denen über die Bestimmung der Kronendachlücken indirekt LAI-Werte abgeleitet werden (z. B. Jonckheere et al., 2004; Wagner & Hagemeyer, 2006; Schwalbe et al., 2009);
- **spezielle Messinstrumente** wie das *LAI 2000*;
- **Fernerkundungsmethoden**
- Methoden, die aus **terrestrischen Laserscannerdaten** (z. B. Henning & Radtke, 2006b; Jupp et al., 2008, Huang & Pretzsch, 2010) den LAI ermitteln.

Generell ist festzuhalten, dass indirekte Methoden ungenauer im Vergleich zu den direkten Methoden sind, da die Ungleichverteilung der Blätter (Klumpungsindex) nicht berücksichtigt wird. Unter der Klumpung von Blättern ist zu verstehen, wie dicht und gehäuft die Blätter an einem Ast auftreten.

8.1.2 PAD-Ableitung aus Voxeldaten terrestrischer Laserscannerpunktwolken

Um eine Vegetationsverteilung aus den Laserscannerdaten abzuleiten, werden die unorganisierten Punktwolken in einen Voxelaum transformiert. Es werden Voxelattribute bestimmt, die je nach Punktzahl und -anordnung variieren. Zur PAD-Ableitung aus den Laserscannerpunktwolken ist ein Programm entstanden, welches die Punktwolken im Voxelaum mit dem Verfahren der Strahlverfolgung analysiert. Anhand von Voxelattributen wird eine Reflexionswahrscheinlichkeit bestimmt (Bienert et al., 2010b), die dem PAD gleichzusetzen ist (Queck et al., 2012). Auf Grundlage der PAD-Verteilung wird eine Grobstruktursimulation angeschlossen, um die turbulente Strömung an Waldrandkanten zu modellieren.

8.1.2.1 Voxelattribute

Zur Ableitung der PAD-Verteilung werden Voxelattribute bestimmt, die u. a. eine Analyse der räumlichen Punktverteilung zulassen. Die Attribute werden in zwei Gruppen eingeteilt: in statistische Werte und in Parameter, die Aussagen über die Punkteverteilung ermöglichen. Zu den statistischen Werten gehören:

- die Anzahl der im Voxel befindlichen Punkte n_{hit} ;
- die Anzahl der Durchschüsse n_{miss} ;
- die Anzahl $n_{occlusion}$ der Punkte, die vor dem Voxel zu einem Treffer geführt haben, wodurch kein Treffer bzw. Durchschuss stattfinden konnte;
- Anzahl der Scanpositionen i , von denen die Punkte im Voxel erzeugt wurden;
- Reflexionswahrscheinlichkeit P_{total} .

Zu der Gruppe der Parameter, die eine Analyse der Punktverteilung ermöglichen, zählen:

- der Schwerpunkt,
- die Eigenvektoren,
- die Begrenzungsbox,
- die Anzahl der Punktcluster mit den dazugehörigen Schwerpunkten,
- die Standardabweichung der Differenzen aller Punkte zum Schwerpunkt.

Zur Berechnung dieser Attribute werden alle im Voxel befindlichen Punkte verwendet. Aus der Analyse der Parameter sind Aussagen über die im Voxel enthaltenen Vegetationselemente möglich. Diese Informationen sind für numerische Simulationen der turbulenten Windfelder von Interesse, da die Verteilung der Vegetationselemente einen signifikanten

Einfluss auf das Geschwindigkeitsfeld hat. Verwendet man den Eigenvektor des größten Eigenwertes, kann bei geeigneter Voxelgröße der Verlauf der Stammoberfläche und der Äste wiedergegeben werden. Abbildung 8.1 zeigt anhand einer Fichte die Eigenvektoren des größten Eigenwertes, von zuvor separierten Punktclustern (vgl. Abschnitt 5.8.1) in einem Voxelraum mit 50 cm großen Voxeln.

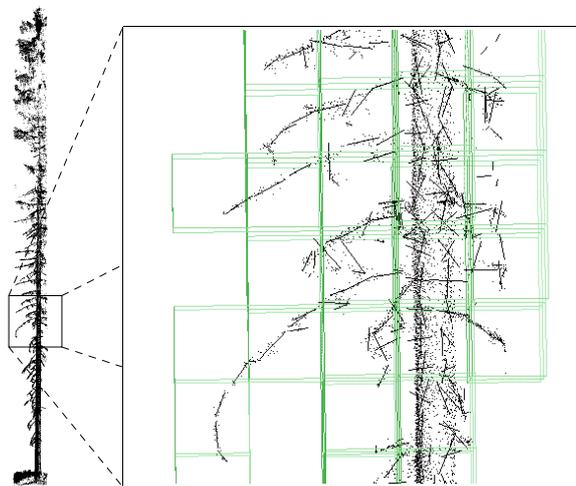


Abbildung 8.1: Ermittelte Eigenvektoren von Punktclustern einer Fichte in 50 cm großen Voxeln (modifizierte Abbildung aus Bienert et al. (2010b)).

8.1.2.2 Voxelraumanalyse

Bei der Transformation der Laserscannerpunkte in den Voxelraum findet die Zuweisung der Punkte pro Voxel statt. Daraus lässt sich die Punktzahl bestimmen. Durch Verfahren der Strahlverfolgung (engl. *ray tracing*) werden die Laserstrahlen, die zu einer Reflexion geführt haben (und darüber hinaus), rekonstruiert. In Abbildung 8.2 ist dies anhand von vier Punkten für den zweidimensionalen Fall dargestellt. Die maximal mögliche Länge des Strahls wird von der Reichweite des Distanzmessers des Laserscanners vorgegeben. Für jeden Punkt im Voxelraum wird der Strahl zu dem Laserscannerstandpunkt gebildet und folgende Zähler werden inkrementiert:

- n_{hit} für jeden Punkt, der sich in einem Voxel befindet;
- n_{miss} , sobald der Strahl ein Voxel durchläuft und dieser erst nach dem Voxel einen Treffer erzielt;
- $n_{occlusion}$, sobald der verlängerte Strahl (bis zur maximalen Reichweite) nach dem Treffer ein Voxel erreicht.

Bei mehreren Standpunkten wird die Zählung standpunktweise durchgeführt. Eine genaue Beschreibung der Strahlberechnung wird in Bienert et al. (2010b) vorgestellt.

Das Zählen der verschiedenen Strahlzustände führt zu einer Voxelraumklassifizierung, die u. a. in Aschoff et al. (2006) und Schmidt (2010) präsentiert wird. Der Voxelraum lässt sich in Voxel verschiedener Klassen einteilen:

- 1) beobachtete Voxel (Abbildung 8.2, gelbe Voxel),
- 2) leere Voxel (Abbildung 8.2, grüne Voxel),
- 3) komplett verdeckte Voxel (Abbildung 8.2, rote Voxel),
- 4) unbeobachtete Voxel (Abbildung 8.2, blaue Voxel).

Komplett verdeckte Voxel entstehen an Stellen, an denen Treffer möglich gewesen wären, wenn nicht vorher alle Strahlen zu einer Reflexion geführt hätten. Für den Fall eines Baumstammes (z. B. Durchmesser 40 cm), der von einem Standpunkt aus gescannt wird, sind die Voxel mit einer Größe von 5 cm, die innerhalb des Baumstammes und hinter ihm liegen, komplett verdeckt. Unbeobachtete Voxel hingegen sind Voxel, die außerhalb des Sichtfeldes des Laserscanners liegen. Dies tritt bei Voxelzellen auf, die sich über einem horizontal aufgebauten Laserscanner mit einem Sichtfeld von $80^\circ \times 360^\circ$ befinden. Während die beobachteten (mit Treffer gefüllten) Voxel Informationen über die

Vegetationsverteilung geben, liefern die leeren Voxelzellen zusätzliche Informationen zur mittleren freien Weglänge zwischen den Vegetationselementen, die für die Strömungsausbreitung von Interesse ist.

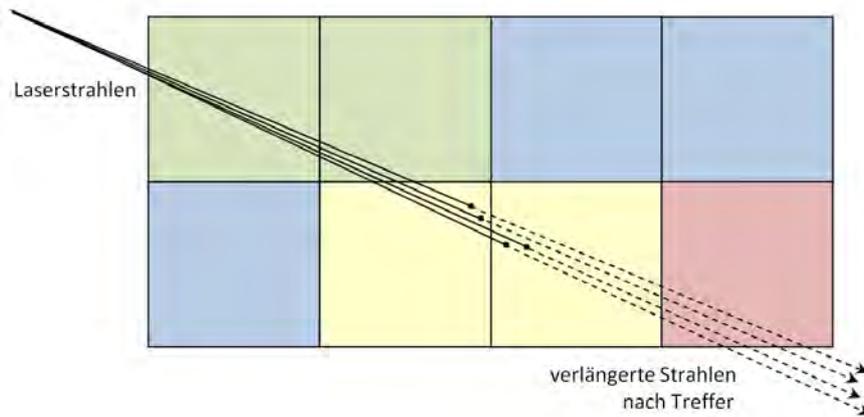


Abbildung 8.2: Prinzip der Strahlverfolgung mit den klassifizierten Voxelzellen (gelb - beobachtete Voxel mit Treffern; grün - leere Voxel; rot - komplett abgeschattete Voxel; blau - unbeobachtete Voxel).

Die Anzahl der Punkte, der Durchschüsse und der Abschattungen ermöglicht die Klassifikation in vier verschiedene Voxelzellen:

Tabelle 19: Klassifikation der Voxelzellen (modifizierte Tabelle in Anlehnung an Schmidt (2010)).

Voxel	Anzahl der		
	Punkte (n_{hit})	Durchschüsse (n_{miss})	Abschattungen ($n_{occlusion}$)
beobachtete	> 0	≥ 0	≥ 0
leere	$= 0$	> 0	≥ 0
verdeckte	$= 0$	$= 0$	> 0
unbeobachtete	$= 0$	$= 0$	$= 0$

8.1.2.3 Reflexionswahrscheinlichkeit

Zur Ableitung der PAD-Verteilung wird für jedes Voxel eine Reflexionswahrscheinlichkeit P_{total} ermittelt. In Queck et al. (2012) wird die Methode zur Berechnung der Reflexionswahrscheinlichkeit vorgestellt, die hier zusammenfassend präsentiert wird. In die Berechnung von P_{total} fließt ein, wie viele Laserstrahlen überhaupt bis zum Voxel vordringen konnten und wie viel Vegetation im Voxel vorhanden ist. Die mögliche Maximalanzahl an Strahlen, die ein Voxel erreichen, bestimmt sich aus der Summe der Trefferstrahlen, der zuvor abgeschatteten und der durchgeschossenen Strahlen pro Standpunkt i :

$$n_{max} = n_{hit,i} + n_{miss,i} + n_{occlusion,i} \quad (8.1)$$

Pro Standpunkt i wird eine Wahrscheinlichkeit P_i pro Voxel bestimmt:

$$P_i = \frac{n_{hit,i}}{n_{hit,i} + n_{miss,i}} \quad (8.2)$$

Da mehrere Standpunkte zur Berechnung der Reflexionswahrscheinlichkeit P_{total} verwendet werden, wird zusätzlich noch eine Gewichtsfunktion w_i eingeführt:

$$w_i = \frac{n_{hit,i} + n_{miss,i}}{n_{max,i}} \quad (8.3)$$

Letztendlich ergibt sich P_{total} aus P_i und w_i zu:

$$P_{total} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (8.4)$$

Die Reflexionswahrscheinlichkeit P_{total} repräsentiert den PAD. Um mögliche Verdeckungen im Kronenraum dennoch zu berücksichtigen, wurden die Reflexionswahrscheinlichkeiten des Voxelraumes mit den vorliegenden gemessenen PAI in der Nähe des Hauptturmes normiert (Queck et al., 2012).

8.1.3 Auswertung der Ergebnisse

In Abbildung 8.3 ist die Klassifizierung des Voxelraumes an einer 10 m x 10 m großen Fläche exemplarisch dargestellt. Die Punktwolke setzt sich aus zwei Bodenaufnahmen und zwei zueinander verschwenkten Scannerpositionen (mit einer Lücke) vom Hauptturm zusammen. Dies erklärt die unbeobachteten Voxelzellen im oberen Kronenbereich. Es wird ebenfalls ersichtlich, dass in Abbildung 8.3 d zwei komplett abgeschattete Bereiche im Voxelraum existieren. Dennoch ist das Verhältnis der abgeschatteten Voxel zu den sichtbaren Voxeln sehr gering und für die Zwecke der Simulation vertretbar. Eine Methode, diese Bereiche dennoch mit einer Reflexionswahrscheinlichkeit zu belegen, wird im Fazit vorgestellt.

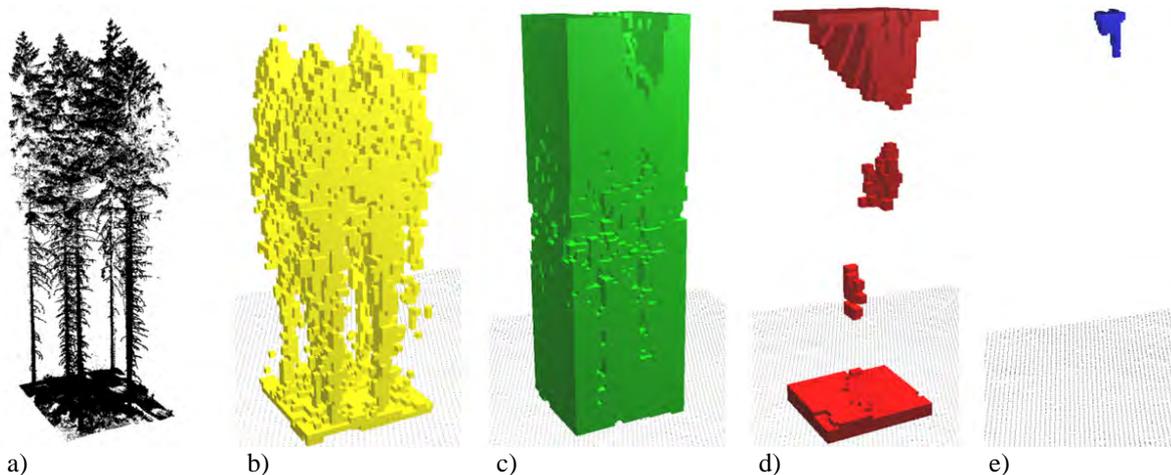


Abbildung 8.3: Klassifizierte Voxelzellen am Beispiel eines 10 m x 10 m x 36 m großen Voxelraumes mit 50 cm großen Voxeln; a) Punktwolke; b) beobachtete Voxel mit Treffern; c) leere Voxel ohne Treffer; d) komplett abgeschattete Voxel; e) unbeobachtete Voxel.

Für einen 191 m x 60 m x 40 m großen Voxelraum des Fichtenbestandes mit 1 m großen Voxeln wurden die Reflexionswahrscheinlichkeiten bestimmt, die dann zur Berechnung der PAD-Verteilung genutzt wurden. Abbildung 8.4 zeigt zwei Profile entlang der Turmstandpunkte. In Abbildung 8.4 a ist eine farbcodierte Darstellung der im Voxel befindlichen Punkte der Riegl-Scannerstandpunkte der im Sommer 2008 durchgeführten Messkampagne über eine Profildbreite von 60 m dargestellt. Das untere Profil zeigt die PAD-Verteilung anhand eines 20 m breiten Profils. Dabei

symbolisieren die dunklen Voxel Bereiche mit einer hohen PAD-Verteilung und die hell-grünen bis grauen Voxel solche mit niedrigen PAD-Werten.

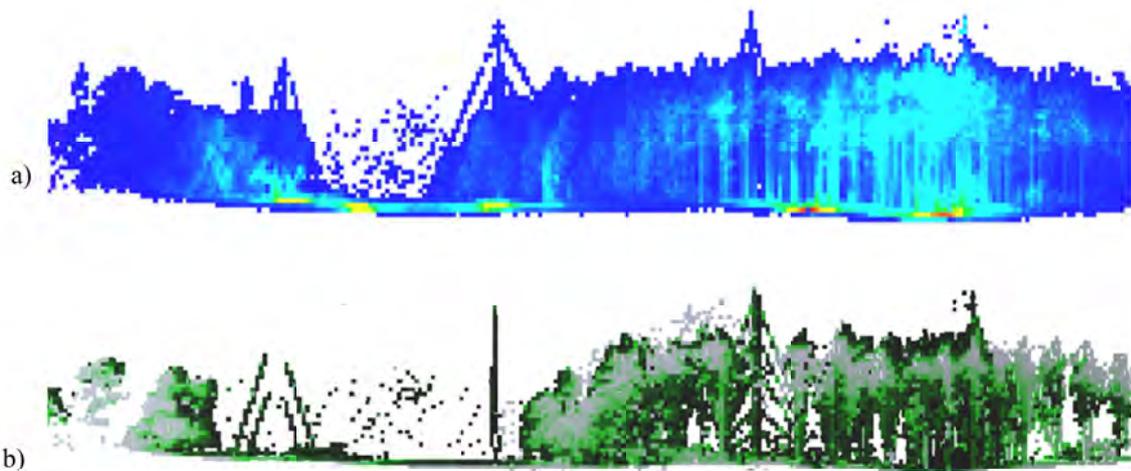


Abbildung 8.4: Voxelraumprofile des Fichtenbestandes mit einer Voxelgröße von 1 m und einer Länge von 191 m. a) Das obere Profil repräsentiert den Voxelraum über eine Profilbreite von 60 m und stellt die Anzahl der im Voxel befindlichen Laserscannerpunkte dar (Farbskala: rot = hohe Punktzahl bis blau = niedrige Punktzahl). b) Das untere Profil gibt die aus den Reflexionswahrscheinlichkeiten abgeleiteten PAD-Werte über eine Profilbreite von 20 m an (Farbskala: schwarz / dunkel-grün = hohe PAD-Verteilung bis hell-grün / grau = niedrige PAD-Verteilung).

Abbildung 8.5 verdeutlicht die Notwendigkeit der TLS-Daten zur Durchführung von Grobstruktursimulationen (engl. *large eddy simulation*). Dargestellt sind in der Abbildung die Ergebnisse einer numerischen Simulation auf Basis der aus den Laserscannerdaten abgeleiteten PAD-Verteilung sowie einer als homogen angenommenen PAD-Verteilung. Wie anhand der turbulenten kinetischen Energie (K) und der mittleren Geschwindigkeit in Strömungsrichtung (U) zu erkennen ist, beeinflusst die PAD-Verteilung die Ausbreitung von turbulenten Windfeldern (Schlegel et al., 2012). Der Mehrwert der Verwendung von Laserscannerpunktwolken liegt in der präziseren Bestimmung der Vegetationsstruktur und damit der auf die Strömung wirkenden Widerstandskraft. Die resultierenden Geschwindigkeitsfelder erlauben einen detaillierten Einblick in turbulente Strömungen an Waldrandkanten, während bisher homogene Bestandsverteilungen (z. B. Finnigan et al., 2009) als Basis für numerische Simulationen genutzt wurden.

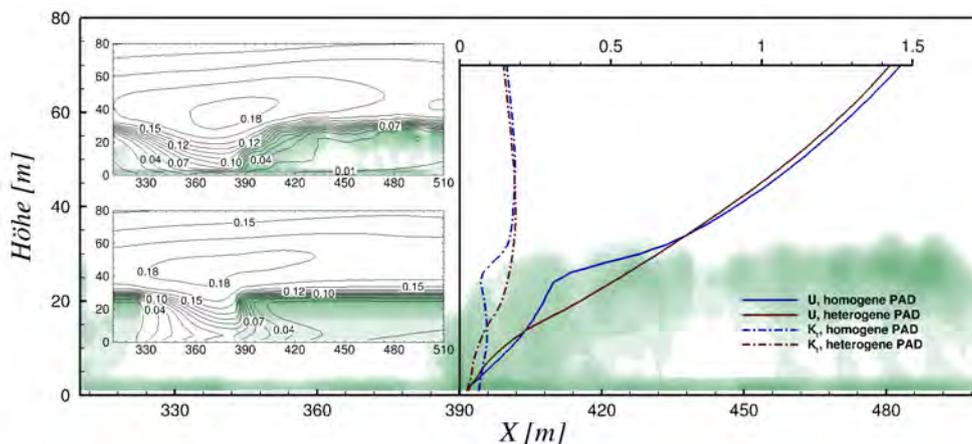


Abbildung 8.5: Die Abbildung rechts zeigt ein gemittelttes Profil des Datensatzes des Fichtenbestandes (mit der Lichtung „Wildacker“) mit Ergebnissen der Large-Eddy-Simulation. Grün dargestellt ist die aus den TLS-Daten abgeleitete PAD-Verteilung. Für die Position $X = 390$ m ist die turbulente kinetische Energie (K_t) und die mittlere Geschwindigkeit in Strömungsrichtung (U) des heterogenen und des homogenen Bestandes angegeben (normiert auf den Betrag der Geschwindigkeit am Hauptmast). Die beiden Abbildungen links vergleichen die turbulente kinetische Energie für die heterogene und die homogene PAD-Verteilung (modifizierte Abbildung in Anlehnung an Schlegel et al. (2012)).

8.1.4 Fazit

Aus den terrestrischen Laserscannerdaten lässt sich die detaillierte Vegetationsverteilung bestimmen. Die Transformation der unorganisierten 3D-Punkte in Voxelräume ermöglicht den Einsatz in numerischen Simulationen. Da für die Berechnung der Reflexionswahrscheinlichkeit nur die Werte der Strahlverfolgung verwendet werden, ist keinerlei Auskunft über die Art der im Voxel befindlichen Vegetation möglich. Zukünftige Arbeiten zielen auf die Verwendung von punktverteilungsbeschreibenden Parametern ab, wie z. B. die Eigenvektoren und die Momente 1. und 2. Ordnung (Maas, 1999), die eine detailliertere Aussage über die Art der Vegetationselemente (Stamm, Äste, Zweige, Blätter) zulassen.

Die Voxelgröße ist entscheidend für die Dimension des Voxelraumes. Eine Halbierung der Voxelgröße hat eine 2^3 -mal größere Datenmenge zur Folge. Zur Reduzierung der Datenmenge sind lokal höher aufgelöste Voxelzellen an Stellen wie Waldrandkanten oder im oberen Kronenraum denkbar. Je kleiner die Voxel werden, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass komplett verdeckte Voxel im Voxelraum enthalten sind. Das Auftreten dieser verdeckten Voxel ist von der Aufstellung des Scanners und von der Vegetationsdichte abhängig (Aschoff et al., 2006). Verdeckte Voxel können zwar detektiert werden, aber zuverlässige Aussagen über die tatsächliche Vegetationsverteilung in den komplett abgeschatteten Voxeln können nicht getroffen werden. Denkbar ist die Anwendung von morphologischen Operatoren (Dilatation) auf den Voxelraum, um die Reflexionswahrscheinlichkeiten der abgeschatteten Bereiche über die Interpolation der angrenzenden Voxelzellen zu bestimmen. Allerdings könnte dies je nach Voxelgröße und Vegetationselement (Stammraum, Kronenraum) zu falschen Prognosen führen. Des Weiteren muss die Methode an einem geeigneten Testfeld mit Objekten (Stäbe, Gitter o. ä.) in bekannten Größen und Abständen validiert werden.

8.2 Statische und dynamische Verformungsstrukturen an Bäumen

Der Jahrhundertsturm Lothar im Dezember 1999 richtete mit 185 Mio. Kubikmeter Schadh Holz in Mitteleuropa einen verheerenden Schaden an (Hillmann, 2006). Da das Auftreten von Stürmen auch zukünftig nicht zu verhindern ist, wird angestrebt, die Schadensauswirkung von Sturmereignissen besser zu kalkulieren und durch geeignete waldbauliche Maßnahmen und durch Optimierung der Durchforstung den Auswirkungen entgegenzuwirken. Bereits existierende Konzepte (Baumartenmischung und Verjüngungsverfahren) können durch umfangreiche Sturmanalysen und mit dem Wissen über den Zusammenhang von Vegetationsstruktur und Turbulenzen im Bestand angepasst und somit verbessert werden. Auf dynamische Windlasten reagieren Bäume durch Baumschwingungen. Zur Analyse von Baumschwingungen in Folge einer äußeren Krafteinwirkung werden Beschleunigungsaufnehmer oder Neigungssensoren eingesetzt. Bei diesen Schwingungen haben im Hinblick auf die Sturmgefährdung des Waldes die Biegeschwingungen die größte Bedeutung (Amtmann, 1986). Bei einmaligen, sehr starken Windböen treten Torsionsschwingungen auf (Mayer, 1985), die eher selten sind. Während der Baumschwingung ändert sich die Geometrie des Stammes und der Krone. Es kommt zu einer zeitabhängigen Verformung des Baumstammes. Die Elastizität der oberirdischen Baumstruktur kann dabei problemlos durch photogrammetrische Methoden erfasst und analysiert werden. Die Wurzelanatomie hingegen, die die Standfestigkeit eines Baumes bestimmt, kann nur durch umständliches Freilegen oder durch Wurzelradarinstrumente bestimmt werden.

Über bildgebende Sensoren ist eine berührungslose Dokumentation des Verformungsverhaltens möglich. In diesem Abschnitt werden Ansätze zur Analyse statischer und dynamischer Verformungsstrukturen an Bäumen vorgestellt. Je nach Experimentaufbau kommen unterschiedliche Messverfahren zum Einsatz (Abbildung 8.6). Zur Erfassung von statisch ausgelenkten Bäumen unter Zuglast ist das 3D-Laserscanning als sequentielles Messverfahren geeignet. Der Schwingungsvorgang selbst wird mit Bildsequenzen einer stationär aufgebauten Kamera aufgenommen, er wird ergänzend in Abschnitt 8.2.4 vorgestellt. Zunächst soll der folgende Abschnitt einen kurzen Einblick in die hauptsächlich durch Windkraft verursachten Baumschäden geben.

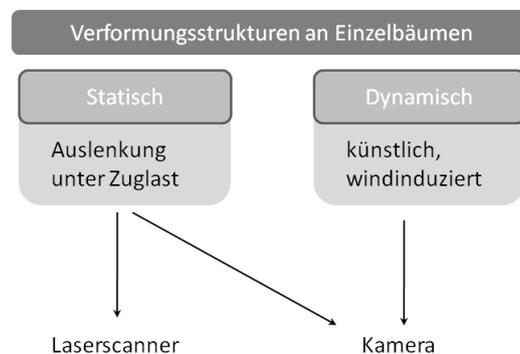


Abbildung 8.6: Einteilung der Experimente und deren Messmethoden.

8.2.1 Schäden an Bäumen

Eine große Anzahl von Untersuchungen beschäftigt sich mit der Belastung von Bäumen durch Wind (u. a. Mayer, 1985; Amtmann, 1986; Coutts & Grace, 1995). Wirkt auf einen Baum eine äußere Kraft ein, entsteht ein Biegemoment am Baum. Gleichzeitig setzt der Baum dem Biegemoment ein Widerstandsmoment entgegen. Sobald das Biegemoment größer als das entgegengesetzte Widerstandsmoment ist, kommt es zu Schäden am Baum, was bei Windgeschwindigkeiten ab 62 km/h zu erwarten ist (Schmidtke & Scherrer, 1997). Wird ein Baum durch Windstöße angeregt, deren Frequenz nahe an der Eigenfrequenz des Baumes liegt, kann es zu einem *Baumbruch* oder *-wurf* kommen. Beim Bruch halten die Wurzeln der Belastung stand und der Stamm bricht nach Überschreitung der Biegefestigkeit oberhalb der Wurzeln. Hält die Bodenverankerung der Kraft nicht stand, wird der Baum samt Wurzelwerk umgeworfen, was als *Baumwurf* bezeichnet wird. Treten diese Schäden in Folge eines Sturmes in Beständen auf, wird von *Windbruch* und *Windwurf* gesprochen. Druckschäden in Form von gebogenen und

schiefstehenden Bäumen nach einer Krafteinwirkung treten speziell dann auf, wenn durch den Druck die Holzstruktur beschädigt wurde und somit ein Aufrichten in die Ausgangslage nicht mehr möglich ist. Hubrig (2004) führt neben den erwähnten Arten noch die *Entrindung* (aufgrund von mitgeführten Kleinteilen wie Steine und Sand, die die Rinde beschädigen) und das *Herausreißen* ganzer Bäume, gar Baumgruppen auf. Diese Schäden treten bei starken Tornados auf und sind in Mitteleuropa eher seltener vorzufinden. Neben den meteorologischen Verhältnissen (Windgeschwindigkeiten), die zur Ausübung eines Schadens führen, spielen topographische Bedingungen (Windfelder) und die Charakteristik des Bodens (Bodenfaktoren) und des Bestandes (mit Baumarten, Bestandshöhe, Durchforstung) eine entscheidende Rolle (Mayer, 1985).

Die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Schäden entstehen in Folge von Windeinwirkung auf den Einzelbaum sowie den Bestand. Aber auch Schnee- und Eislasten können zu Brüchen (Schneebruch) am Baum (Stamm oder einzelne Äste) führen. Blitzschlag und Frost hinterlassen ebenfalls Spuren.

Neben den hier genannten Klimaschäden werden oft durch Geweih tragendes Wild (Cerviden) Schäden am Stamm verursacht (Knuchel, 1947). Durch Abreiben der Geweihhaut (Bast) am Stamm wird nicht selten die Rinde in Mitleidenschaft gezogen (Fegeschäden). Speziell in der Brunftzeit treten vermehrt Schlagschäden auf, die als Folge von Imponiergehabe oder Territoriumsmarkierung zu verstehen sind. Dabei schlägt das Tier mit dem Geweih gegen den Stamm und zerstört die Rinde und die darunterliegenden Holzschichten. Aber auch Verbiss-, Nage- und Schältschäden beeinflussen das Rindenbild. Selten bleibt es nur bei Stammdeformationen – das Absterben des Baumes ist die Konsequenz. Holzfehler und Holzschäden, wie sie von Organismen und vom Klima verursacht werden, haben eine Wertminderung zur Folge und führen im schlimmsten Fall zum Verlust des Holzes.

8.2.2 Experimentaufbau

In Stiel (2010) wurden Zuglastexperimente an einem 7 m hohen Straßenbaum durchgeführt. Die Auslenkung des Baumes erfolgte mit einem Zugseil, welches auf etwa halber Baumhöhe fixiert wurde (Abbildung 8.7). Die Tests unterteilten sich in zwei prinzipielle Versuchsanordnungen. Zum einen wurde die statische Deformation mit einem Laserscanner und zum anderen das dynamische Verformungsverhalten nach Krafteinwirkung mit einer Kamera aufgenommen.

Beide Epochen (unbelasteter Zustand des Baumes und simulierte statische Deformation) wurden mit dem Laserscanner Riegl LMS-Z420i vom selben Standpunkt aufgenommen. Mit einem durchschnittlichen Abstand des Scanners von 10 m zum Baum und einer Scanauflösung von 0,03 ° ergab sich ein mittlerer Punktabstand am Stamm von 5 mm.

Für die Analyse des dynamischen Verformungsverhaltens wurden Bildfolgen einer Baumschwingung mit einer CASIO EX-F1 Kamera aufgenommen. Es wurden die Trajektorien von künstlich induzierten Baumschwingungen (Zugversuch) und unter natürlichem Windeinfluss verursachte Baumschwingungen untersucht. Dabei ist zu beachten, dass die Kamera orthogonal zur Bewegungsrichtung aufgebaut ist. Die Bilderfassungsrate ist in Abhängigkeit von der Eigenfrequenz f_E des Baumes (Gleichung 8.5 nach (Sinn, 2003)) und von der sich daraus ergebenden zeitlichen Auflösung der Objektbewegung zu wählen. Die Eigenfrequenz bestimmt sich aus dem Stammdurchmesser d_{Stamm} , dem Quadrat der Stammlänge l_{Stamm} und dem Faktor 250.

$$f_E = 250 * \frac{d_{Stamm}}{l_{Stamm}^2} \quad (8.5)$$

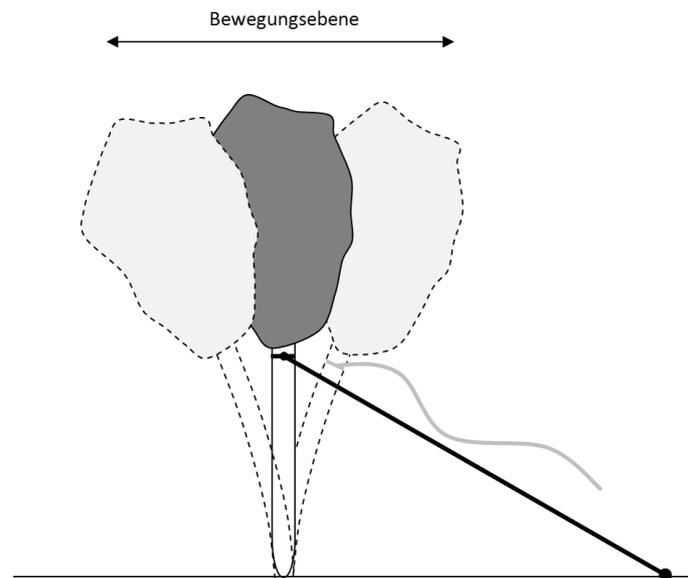


Abbildung 8.7: Experimentaufbau Zugversuch.

8.2.3 Statische Versuche

Wird ein Baum durch eine äußere Kraft belastet, biegt er sich. Die verformte Baumachse kommt einer Biegelinie gleich. Die Bestimmung der Verformung erfolgt über diskrete signalisierte Punkte am Stamm (Abbildung 8.8). Bei genügend dichter Signalisierung des Stammes geben die 3D-Koordinaten der Zielmarken im Soll-Ist-Vergleich die Größe und Richtung der Deformation wieder.

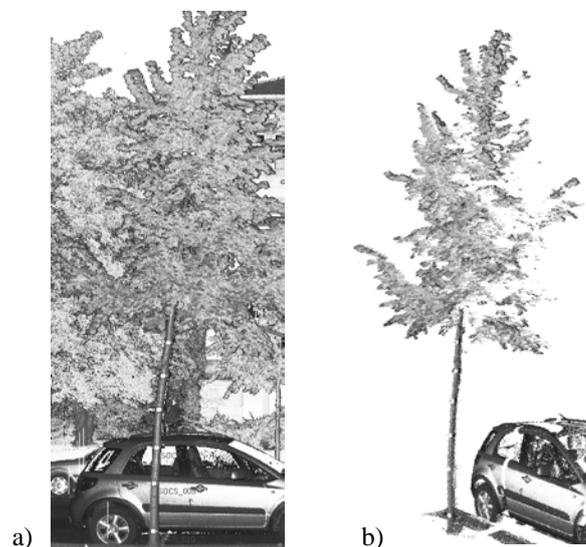


Abbildung 8.8: a) 2D-Intensitätsbild und b) 3D-Punktwolke des Versuchsbaumes im deformierten Zustand (Bienert et al., 2010a).

Eine weitere Variante ist die Deformationserfassung über die 3D-Information der Stammoberfläche durch Approximation ausgleichender Kreise und Zylinder (Abschnitt 5.4.3). Ein Vorteil gegenüber der Analyse mittels diskreter Punkte liegt – neben dem Wegfall der Notwendigkeit der Signalisierung – in der dreidimensionalen Modellierung des Stammes (Abbildung 8.9) und in der zusätzlichen Bestimmung von Parametern wie Stammradius und

Neigung des Stammabschnittes im Raum. Die Biegung der Baumachse lässt sich zum einen durch die Verbindungslinie der Mittelpunkte ausgleichender 2D-Kreise dünner Stammsegmente beschreiben und zum anderen über Verschiebungsvektoren durch Änderung der normierten Richtungsvektoren höhenabhängiger Baumachsensegmente. Unter Einbezug der Rundheit des Stammes und von Astansätzen ist die Bestimmung der Torsion ebenfalls möglich.

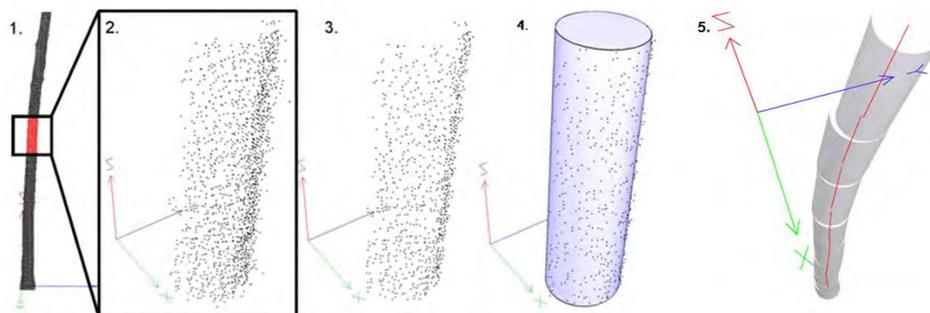


Abbildung 8.9: Stammbestimmung im statischen Experiment: 1. Bereinigte Punktwolke des Stammes; 2. Selektierte Punktwolke; 3. Punktwolke nach n -maligem Ausreißertest; 4. Approximierter Zylinder; 5. In den Baumstamm eingepasste Zylinder (entnommen aus Bienert et al. (2010b), in Anlehnung an Stiel (2010)).

Neben der Stammfläche ist die Kronenfläche ein entscheidender Parameter bei der Berechnung von Luftwiderstandsbeiwerten. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit wird die Baumkrone immer stärker gebogen und die Angriffsfläche des Windes ändert sich stetig. Neben herkömmlichen Messmethoden ist die Ableitung beliebiger Kronenprojektionsflächen aus den Laserscannerpunkten einer separierten Krone möglich. Ein Verfahren zur Bestimmung der Kronenprojektionsfläche wurde in Abschnitt 5.7.2 vorgestellt, daher wird hier nur darauf verwiesen.

8.2.4 Dynamische Versuche

In erster Näherung kann die Biegeschwingung eines Baumes als abgeschlossenes System angesehen werden, d. h. die Energie bleibt nach dem Energieerhaltungssatz stets konstant. Wird ein Baum durch eine äußere Krafteinwirkung (Windböe) aus seiner Ruheposition ausgelenkt und in Bewegung versetzt, so ergibt sich seine Gesamtenergie aus Bewegungsenergie (kinetische Energie) und Verformungsenergie (potentielle Energie). Erreicht der Baum die maximale Auslenkung, wird seine potentielle Energie maximal und die kinetische Energie Null. Beim Durchqueren der Ausgangssituation (Ruheposition des Baumes) erreicht die kinetische Energie ihr Maximum und die potentielle Energie wird Null. Der Baum schwingt nun gegen die Windrichtung und der gesamte Vorgang wiederholt sich. Bei einer einmaligen Krafteinwirkung schwingt der Baum um seine Ausgangsposition mit immer kleiner werdenden Amplituden (gedämpfte Schwingung), bis er letztendlich in seine Ruheposition zurückkehrt.

Die photogrammetrische Bestimmung von Baumparametern in Einzelbildern wird seit Mitte des letzten Jahrhunderts praktiziert. Aufwendige Baumhöhenbestimmungen durch Besteigen der Baumkrone wurden durch den Einsatz von Kameras als Messinstrumente überflüssig. Durch Entzerrung der Einzelbilder auf eine Ebene parallel zum Stamm, mit orthogonaler Blickrichtung der Kamera und einem Referenzmaßstab im Bild, lassen sich Baumhöhe, Stammdurchmesser und Kronenparameter (Gaffrey et al., 2001; Dean, 2003; Pyysalo, 2004) bestimmen.

Durch monoskopische Bildsequenzen lässt sich das Schwingungsverhalten dokumentieren. Durch Punkte entlang des Baumstammes wird die Stammgeometrie beschrieben. Dies geschieht zum einen durch diskrete Punkte in Form von Zielmarken am Stamm und zum anderen bei einer strukturreichen Rinde über die natürliche Textur des Stammes. Über die Verfolgung von markanten Objektpunkten wird das Deformationsverhalten in Form von zweidimensionalen Trajektorien dargestellt. Die Messung relevanter natürlicher Punkte in den Bildsequenzen und die Zuordnung der Punkte über die einzelnen Bilder einer Sequenz führte (Stiel, 2010) mit einem am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden entwickelten Tracking-Programm (Schwalbe, 2008) durch. Dieses nutzt für die

Zuordnung identischer Objektmerkmale in allen Bildern der Bildfolge ein erweitertes Kreuzkorrelationsverfahren. Zusätzlich zur Verwendung der natürlichen Oberflächentextur des Baumstammes erfolgte eine Objektverfolgung durch Auswertung der am Stamm angebrachten Zielmarken (Abbildung 8.10 a). Bei der Aufzeichnung und Auswertung der windinduzierten Schwingungen liegt die Schwierigkeit in der Festlegung der Bewegungsebene. Aufgrund des natürlichen Windeinflusses kann die Baumschwingung durch den Wind gedämpft, angeregt und von der eigentlich zu vermutenden Bewegungsebene abgelenkt werden, was wiederum zu Lage- und Maßstabsfehlern der Trajektorien im Objektraum führt. Dennoch bleibt die Eigenfrequenz des Baumes erhalten und ist deutlich im Trajektorienverlauf erkennbar (Abbildung 8.10 b). Um Bewegungen der Kamera während der Aufnahme zu detektieren, wurden feste Punkte (Gebäudepunkte) in der Bildsequenz verfolgt.

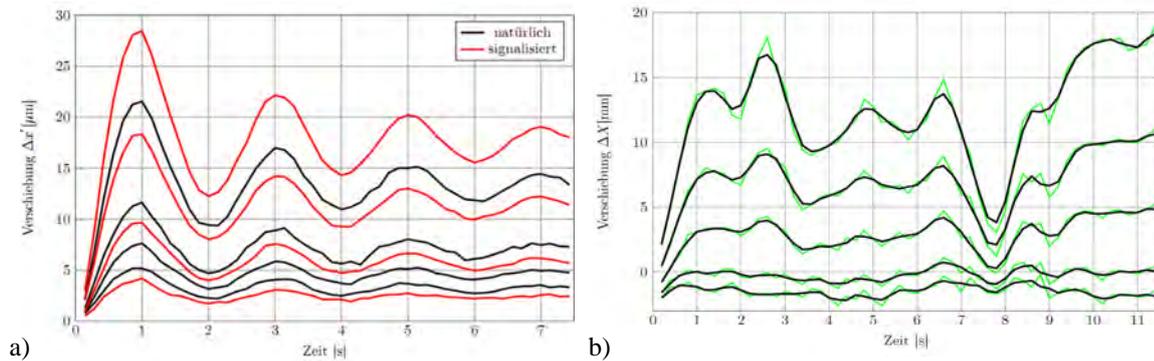


Abbildung 8.10: a) Trajektorienverlauf bei 7 Hz von signalisierten und natürlichen Stammunkten im Bildraum einer künstlich induzierten Schwingung; b) Verschiebungen im Objektraum von 5 unterschiedlichen natürlichen Punkten am Stamm einer windinduzierten Schwingung bei 5 Hz (grün = Originalresultate, schwarz = geglättet durch gleitenden Mittelwert der Ordnung 3) (Stiel, 2010).

8.2.5 Tabellarische Gegenüberstellung der eingesetzten Messverfahren

Die Dokumentation der statischen sowie dynamischen Verformung an Baumstämmen ist mit photogrammetrischen Messmethoden möglich. Je nach Experiment kommen unterschiedliche Messverfahren und -instrumente zum Einsatz. Die unten aufgeführte Tabelle 20 stellt zusammenfassend das Laserscanning der Bildsequenzaufnahme gegenüber.

Tabelle 20: Gegenüberstellung der Messverfahren für statische und dynamische Zugversuche (modifizierte Tabelle aus Bienert et al. (2010a)).

	Terrestrischer Laserscanner	Kamera
Geeignet für	Statische Deformation	Statische und dynamische Deformation
Experimentaufbau	Windlastorientierte Zugversuche	Künstlich oder windinduziert
Aufnahme	Mehrere Millionen 3D-Oberflächenpunkte	Mehrere Einzelbilder (Bildsequenzen)
Ableitung von	Diskrete Punkte (Zielmarken) Stammsegmente Durchmesser Neigung der Stammachse Baumkrone (Projektionsfläche, Ausdehnung)	Diskrete Stammpunkte (künstlich signalisiert oder natürliche Textur) Trajektorien in der Bewegungsebene
Voraussetzung	Windstille	Aufnahmerichtung senkrecht zur Bewegungsebene der Schwingung Bilderfassungsrate in Abhängigkeit von Eigenfrequenz und zeitlicher Auflösung der Objektbewegung Aufnahmeentfernung von Objektiv und Objekthöhe abhängig geeignete Beleuchtung /Lichtverhältnisse
Mögliche Probleme	Objektbewegung während der Aufnahme	Abweichungen von der Bewegungsebene führen zu Maßstabsfehlern

8.2.6 Fazit

Baumschäden in Folge von Natureinflüssen wie Sturm oder Schnee- und Eisbruch treten in den letzten Jahren vermehrt auf. Um diese Schäden so gering wie möglich zu halten, versucht man, mit waldbaulichen Maßnahmen im Bestand den Auswirkungen entgegenzuwirken. Aber auch die Straßenbäume in städtischen Gebieten unterliegen einer regelmäßigen Kontrolle zur Sicherstellung der Verkehrssicherheit. Das Schwingungsverhalten eines Baumes spielt dabei eine entscheidende Rolle.

In diesem Teilkapitel wurden photogrammetrische Methoden vorgestellt, die es ermöglichen, an stehenden Bäumen das Verformungsverhalten zu dokumentieren. Zunächst wurden Baumschadensformen als Folge von Natur- und Tiereinfluss aufgezeigt. Dabei wird ersichtlich, dass Naturkatastrophen verheerende Schäden im Forst anrichten können. Durch verschiedene Experimentdurchführungen kann das Verformungsverhalten von Bäumen unter äußeren Krafteinwirkungen nachempfunden werden. Die Dokumentation der statischen Verformung an Stämmen mit einem Laserscanner wurde neben der dynamischen Auswertung mit Hilfe von Bildsequenzen präsentiert.

Es wurde gezeigt, dass durch photogrammetrische Methoden die Verformung berührungslos und zerstörungsfrei dokumentiert werden kann. Bei Bäumen mit Höhen bis zu 30 m entfällt somit das manuelle Abgreifen von Maßen, was die Effizienz der Methode steigert. Durch das Einpassen von Zylindern in mehrere tausend Datenpunkte eines

Stammabschnittes sind 3D-Daten des Stammes ableitbar. Über die Variation der Zylinderhöhe und der Ausrichtung der Zylinderachse werden zusätzlich Stammkrümmung und -neigung beschrieben.

Das dynamische Verhalten von Baumschwingungen wurde aus Bildsequenzen einer handelsüblichen Digitalkamera abgeleitet. Dies geschieht zum einen anhand von signalisierten Punkten oder mit natürlichen Strukturausschnitten. Liegt eine strukturreiche Rinde vor, bietet sich als preiswerte Alternative die automatische Verfolgung natürlicher Punkte in monoskopischen Bildsequenzen an. Neben dem verschwindend geringen instrumentellen Aufwand bietet sich hier der große Vorteil der Abdeckung größerer Bereiche und einer hohen zeitlichen Auflösung. Die Beschränkung auf zweidimensionale Trajektorien kann in vielen Fällen, in denen die Hauptbewegungsebene definiert ist, akzeptiert werden. Im Fall einer windinduzierten Bewegung können dreidimensionale Bewegungen durch eine geeignete Signalisierung oder aus stereoskopischen Bildsequenzen bestimmt werden. Anstatt einzelner Zielmarken können 3D-Maßstäbe mit einer bekannten Basis Abweichungen von der Bewegungsebene aufdecken. Dazu werden in den Einzelbildern bekannte Strecken mit Anfangs- und Endpunkt getrackt. Über signifikante Streckenveränderungen in aufeinander folgenden Bildern werden so Abweichungen von der Ebene detektiert. Geeignete Zielmarkenkonstellationen am Objekt ermöglichen die Berechnung räumlicher Rückwärtsschnitte in jedem Bild. Da die Kamera während der Aufnahme fixiert ist, sind die berechneten Parameter der äußeren Orientierung (Translation und Rotation) auf die Bewegung der Zielmarkenkonstellationen des Objektes zurückzuführen.

Es wird ersichtlich, dass der Einsatz einer Kamera eine genaue, schnelle und preiswerte Alternative zum terrestrischen Laserscanning ist, wenn es nur um die statischen Verformungsstrukturen und das dynamische Bewegungsverhalten des Baumstammes geht. Allerdings ist das terrestrische Laserscanning für die 3D-Aufnahme komplexer Baumstrukturen im Vergleich zu manuellen Datenerfassungsmethoden im Forst ein objektives und schnelles Messverfahren.

8.3 Analyse der Rindenstruktur zur Baumartenerkennung

Der Stamm wird von Gewebeschichten umschlossen, die als Rinde bezeichnet werden. Diese Gewebezellen sind einer zeitlichen Veränderung unterlegen. Jede Baumart bildet ihre eigene Rindenstruktur aus, die teilweise altersabhängig ist (Roloff, 2010). Die Strukturen reichen von glatt (Buche) über schuppenförmig und rissig (Fichte) bis hin zu ausgeprägten Rippen mit tiefen Längsfurchen (Stieleiche). Vaucher (1990) unterscheidet insgesamt 18 verschiedene Rindentypen. Die Abbildung 8.11 zeigt die Rinden von fünf ausgewählten Baumarten.

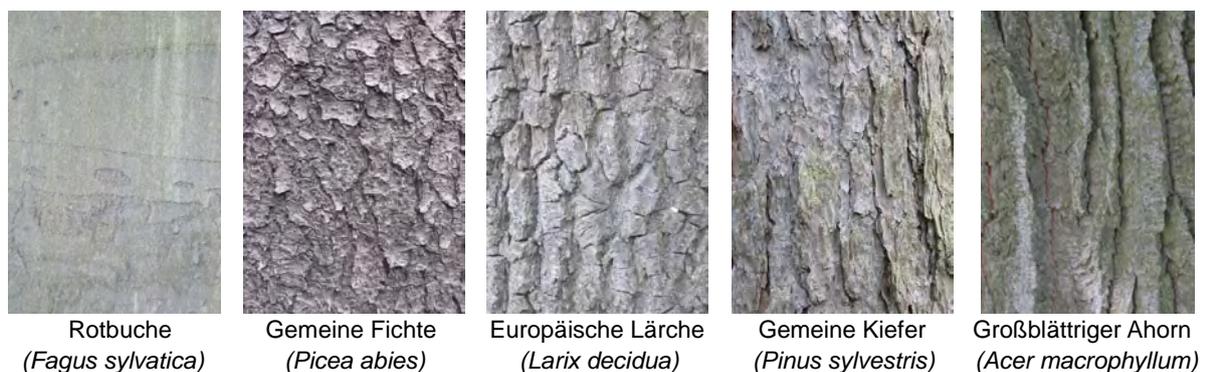


Abbildung 8.11: Rindenstrukturen verschiedener Laub- und Nadelbäume.

Unterschiedliche Oberflächenstrukturen lassen Muster in den Rinden erkennen, die als Texturen bezeichnet werden. In Bildern äußert sich die Textur in der Variation der Grauwertanordnung und hängt vom Bildmaßstab ab (Albertz & Wiggenhagen, 2009). Texturanalysen werden oft zur Segmentierung und Objekterkennung, u. a. in Luft- und Satellitenbildern, wie auch in Bildern für medizinische Analysen, herangezogen. Dabei geschieht die Bestimmung von Texturmerkmalen auf Basis des Orts- oder Frequenzraumes. Gegenstand vergangener Forschungen ist neben der Baumdetektion und -extraktion die Baumartenerkennung in Luftbildern. Neben Farb- und Texturanalysen (u. a. Koch et al., 2002; Adler, 2001) trägt die Kronenform und -struktur ebenfalls zur Erkennung bei. Die Variabilität der Rindenstruktur bietet ebenfalls Potential für Texturanalysen in terrestrisch aufgenommenen Bildern zur Erkennung von Baumarten (Haala et al., 2004; Reulke & Haala, 2005; Byrne & Singh, 1998). Aufgrund der ständig wechselnden Lichtverhältnisse im Wald (diffuses Licht, direkte Sonneneinstrahlung) sind Aufnahmen von Baumrinden unter konstanten Bedingungen schwer möglich. Eine vom Licht unabhängige Methode ist die Verwendung der Geometrie der Rindenstruktur durch Abwicklungsverfahren. Dabei werden die Tiefenänderungen der Rinde auf eine gemittelte Fläche abgetragen. Auf Basis dieser Daten werden Grauwertbilder erstellt, die ebenfalls einer Texturanalyse unterzogen werden können. Die Bearbeitungsschritte bis zum Grauwertbild unterteilen sich in die Baumdetektion, den Prozess der Abwicklung, die Rastererstellung und die Grauwertermittlung, die im Abschnitt 8.3.1 vorgestellt werden.

8.3.1 Statistische Texturparameter

Texturparameter sind Werte, die sich aus der Grauwertverteilung und -anordnung berechnen lassen und eine Beschreibung des Musters vornehmen. Eine Einteilung der Texturparameter in statistische Parameter 1. und 2. Ordnung wird in Sali & Wolfson (1992) vorgenommen. Statistische Parameter 1. Ordnung sind Werte, die aus der Analyse des Grauwertistogramms abgeleitet werden. Sie liefern keinerlei Aussagen über die räumliche Verteilung der Grauwerte und sind rotations- und größeninvariant (Jähne, 2002). Zu ihnen zählen z. B. der Mittelwert und die Varianz. Wird neben der spektralen auch auf die räumliche Verteilung eingegangen, spricht man von statistischen Parametern 2. Ordnung. Diese Parameter beschreiben die Beziehung der Nachbapixel aufgrund von statistisch abgeleiteten Werten aus der Grauwertverteilung und sind rotations- und größenvariante Parameter. Unter Aufstellung der Grauwertübergangsmatrix $C_a(\mathbf{i}, \mathbf{j})$ (engl. *co-occurrence matrix*) geben diese Parameter eine bessere Texturbeschreibung als die der 1. Ordnung, da sie, wie bereits erwähnt, die Grauwertkonstellation berücksichtigen.

8.3.1.1 Bearbeitung der Laserscannerdaten

Bevor die Laserscannerdaten einer Texturanalyse unterzogen werden, ist eine Umwandlung der Daten in ein digitales Grauwertbild notwendig. Die einzelnen Schritte werden wie folgt unterteilt (nach Kretzschmar, 2009):

1. Baumdetektion und Extraktion der Stämme
2. Ausschnitt festlegen
3. Abwicklung
4. Erstellung eines Rasters
5. Grauwertinterpolation.

Nach einer erfolgreichen Detektion, manuell oder automatisch nach der im Abschnitt 5.3 beschriebenen Methode, werden Punkte im unteren Stammbereich extrahiert. In Abhängigkeit von der Punktdichte und von der zu erwartenden Struktur wird eine quadratische Fenstergröße festgelegt, die später den Rindenausschnitt darstellt und zur Texturanalyse verwendet wird. Die Größe des Fensters gibt die Höhe der Schicht vor, die aus der Stammpunktwolke in einem konstanten Abstand über dem Baumfußpunkt extrahiert wird. In einem weiteren Schritt werden die Punkte des extrahierten Schnittes einer ausgleichenden Zylinderberechnung unterzogen. Die orthogonalen Abstände der Punkte (Verbesserungen) zur ausgleichenden Zylindermantelfläche werden berechnet und die Punkte über eine Zylinderprojektion abgewickelt. Im Anschluss daran werden die Punkte gerastert. Die Rastergröße sollte dem mittleren Punktabstand entsprechen, sodass jeweils nur ein Punkt in eine Rasterzelle fällt. Befinden sich mehrere Punkte innerhalb einer Rasterzelle (Abbildung 8.12), so wird der Mittelwert \bar{v}_{ij} gebildet. Jeder Mittelwert der Verbesserungen einer Rasterzelle steht für einen Grauwert g in einem 8-Bit-Grauwertbild. Je nach Raster- und Fenstergröße kann es trotz Ausrichtung nach dem mittleren Punktabstand zu leeren Rasterzellen kommen, was zum einen an der fehlerhaften Winkelmessung des Laserscanners (Meierhold, et al., 2010) und zum anderen an der Krümmung des Stammes mit größeren Punktabständen an den Randbereichen (bei einer Single-Scan-Aufnahme) liegt. Mit Interpolationsverfahren werden die leeren Rasterzellen in Abhängigkeit von ihren Nachbarwerten iterativ aufgefüllt.

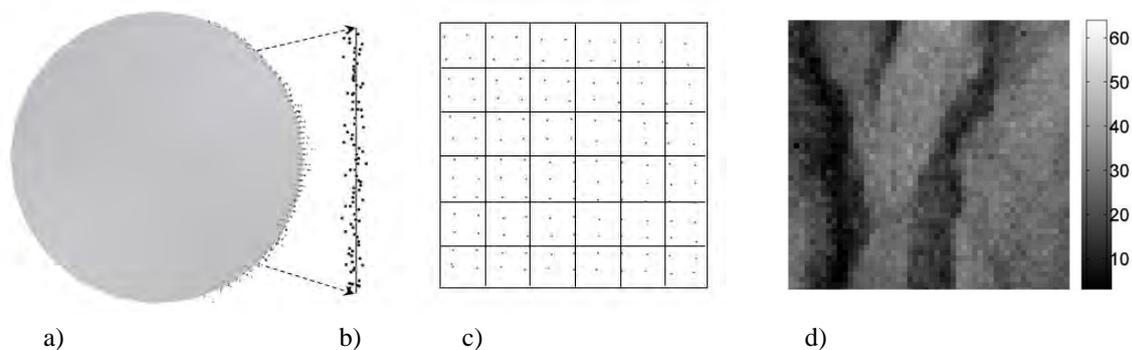


Abbildung 8.12: Prinzip Abwicklung: a) Schnitt einer Punktwolke im Stammbereich mit ausgleichendem Zylinder in der 2D-Projektion; b) abgewickelte Punkte in der Seitenansicht; c) Rastererstellung; d) codiertes Grauwertbild nach Entfernung der Punkte von der Zylinderebene.

8.3.1.2 Grauwertübergangsmatrix

Ein sehr effektives Verfahren in der Texturanalyse ist die Verwendung von Grauwertübergangsmatrizen. Durch statistische Ableitungen im Ortsbereich werden so gezielt die Grauwertverhältnisse in der Umgebung von Referenzpixeln beschrieben. Um eine Grauwertübergangsmatrix zu berechnen, sind quadratische Bildausschnitte notwendig. In der Praxis haben sich Ausschnitte mit 8 bis 64 Graustufen bewährt (Abmayer, 1994), da größere Grauwertstufen rechenaufwändig und aufgrund der vielen Merkmale schwer zu interpretieren sind. Über einen Verschiebevektor d (Δx , Δy), dessen Länge und Orientierung variierbar ist und den es an die Textur anzupassen gilt, wird das Auftreten eines jeden Grauwertpaares in die Grauwertübergangsmatrix geschrieben. Die Länge des

Verschiebevektors gibt den Abstand des Referenzpixels zum Vergleichspixel an und richtet sich nach den vorherrschenden Mikro- und Makrotexturen im zu untersuchenden Bild. Laut Hilliges & Butz (2006) liefern die Nachbarn der ersten und zweiten Ordnung aussagekräftige Grauwertkonstellationen, da größere Entfernungen selten korreliert sind. Die Bildungsvorschrift, auf die hier nicht näher eingegangen wird, ist in Hall-Beyer (2010) ausführlich beschrieben. In Abbildung 8.13 ist der schematische Ablauf zur Erstellung der Texturmaße aus der Grauwertübergangsmatrix dargestellt.

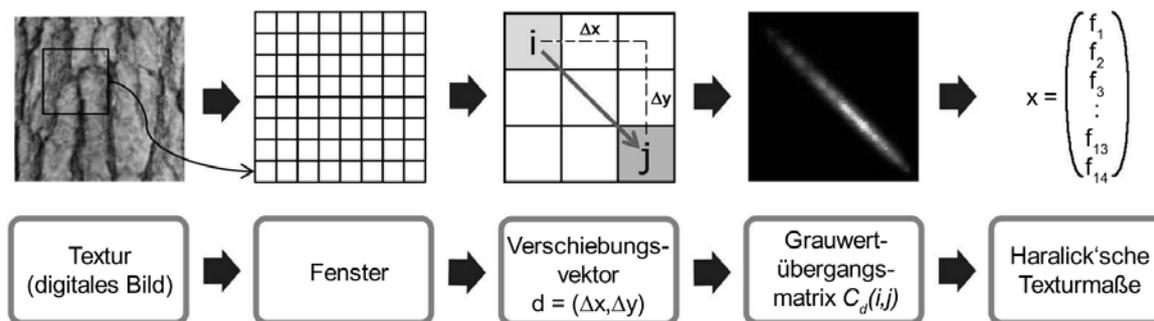


Abbildung 8.13: Ablauf zur Erstellung und Auswertung der Grauwertübergangsmatrix (entnommen aus Kretzschmar (2009), in Anlehnung an Lehmann (1997)).

Aus der Grauwertübergangsmatrix können insgesamt 14 verschiedene Texturparameter abgeleitet werden, die Haralick et al. (1973) wie folgt einteilen:

- Angular Second Moment
- Contrast
- Correlation
- Sum of Squares
- Inverse Difference Moment
- Difference Entropy
- Information Measures of Correlation I & II
- Sum Average
- Sum Variance
- Sum Entropy
- Entropy
- Difference Variance
- Maximal Correlation Coefficient

Von den insgesamt 14 Texturparameter sind nur vier bis sieben Parameter in der Praxis verwendbar, die zusätzlich noch in drei Gruppen zusammengefasst werden können. Hall-Beyer (2010) führt eine Unterscheidung in eine *Kontrastgruppe* mit Kontrast und Homogenität, in eine *Regelmäßigkeitsgruppe* mit Energie, Entropie und maximaler Wahrscheinlichkeit und in eine *Statistik-beschreibende Gruppe* mit Mittelwert, Standardabweichung und Korrelation durch.

8.3.1.3 Anwendungsbeispiel

Die Rinde bildet baumarten-spezifische Muster aus, die sich in den abgewickelten Daten und auch in der Grauwertübergangsmatrix widerspiegeln. Sehr große Grauwertunterschiede werden neben der Hauptdiagonalen abgetragen. Ein typisches Beispiel für eine Grauwertübergangsmatrix mit starkem Kontrast ist in Abbildung 8.14 für Eiche und Kiefer zu sehen. Aufgrund des hohen Kontrastes bei der Verwendung eines horizontalen Verschiebevektors sind die Elemente neben der Hauptdiagonalen mit starken Häufigkeiten besetzt. Bei der Untersuchung von Rindenstrukturen sollte d die halbe Länge einer durchschnittlichen Rippen- bzw. Schuppenbreite nicht überschreiten, um die größten Grauwertunterschiede noch zu detektieren. Die Richtung von d sollte sich an der Strukturrichtung orientieren. Häufig sind, bedingt durch das Stammwachstum, Längsfurchen und -schuppen vorzufinden, was demnach einen horizontalen Verschiebevektor rechtfertigt. In der Abbildung 8.14 sind für die vier häufigsten Baumarten der deutschen Wälder die Grauwertübergangsmatrizen dargestellt. Die Beispiele entstammen den Abwicklungen von Punktwolkenausschnitten eines Faro LS 880 Scanners. Aufgrund der Scanauflösung und der unterschiedlichen

Entfernungen der Bäume zum Sensor stellen die Abbildungen unterschiedlich große Ausschnitte am Objekt dar, die so nicht direkt vergleichbar sind. Allerdings wird sichtbar, dass sich eine Grauwertübergangsmatrix, erzeugt mit einem horizontalen Verschiebevektor bei einer stark strukturierten Rinde, deutlich von weniger kontrastreichen Strukturen abhebt.

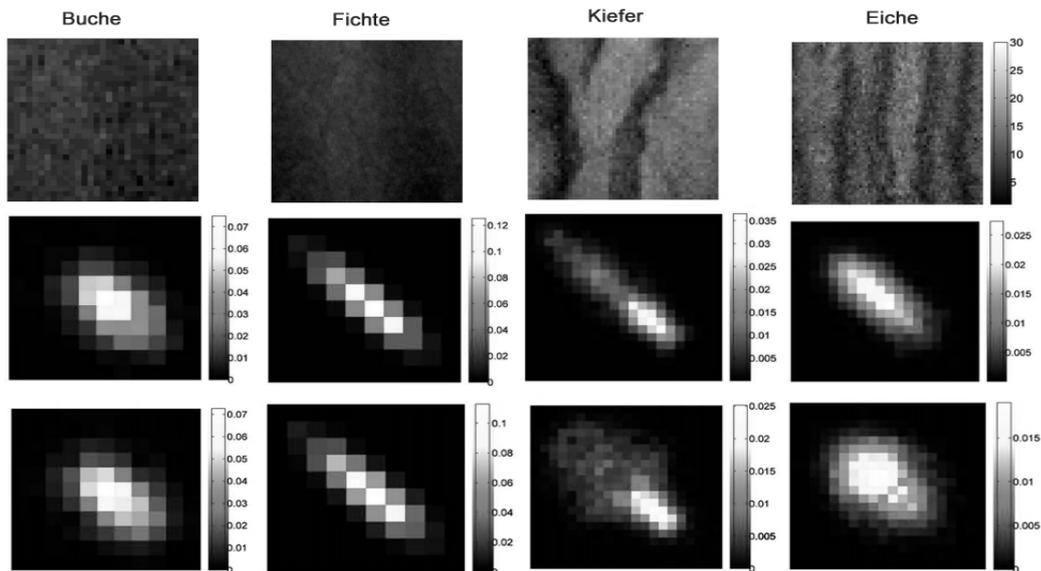


Abbildung 8.14: Auf 30 Grauwerte reduzierte Bilder der abgewickelten Punktwolken (oben) mit den dazugehörigen grafischen Darstellungen der Grauwertübergangsmatrizen mit vertikalem Verschiebevektor $d(0,3)$ (mitte) und horizontalem Verschiebevektor $d(3,0)$ (unten) (Kretzschmar, 2009).

Je nach Rindenstruktur sind in den Texturparametern, wie Kontrast, Entropie und Homogenität, Unterschiede in den Parametern zu finden. Der aussagekräftigste Parameter ist der Kontrast. Auch hier wird in Abbildung 8.15 wieder deutlich, dass ein horizontaler Verschiebevektor der Länge 3 Pixel bei strukturreicher Rinde den deutlichsten Kurvenausschlag ergibt. Über das Zusammenspiel der einzelnen Parameter lässt sich durch geeignete Klassifikationsschemata eine Baumartenerkennung durchführen. In Kretzschmar (2009) wurde an abgewickelten Laserscannerdaten verschiedener Baumarten eine überwachte eindimensionale Hyperbox-Klassifikation für jeden einzelnen Texturparameter durchgeführt. Eine eindeutige Klassifizierung lag vor, sobald alle getesteten Texturparameter einer Baumart aus dem Trainingsgebiet zugeordnet werden konnten. Überraschenderweise schnitt die Baumart Buche mit nur 13 % richtiger Klassenzuordnungen am schlechtesten ab. Aufgrund des Homogenitäts- und Kontrastkriteriums kam es zu Fehlklassifizierungen.

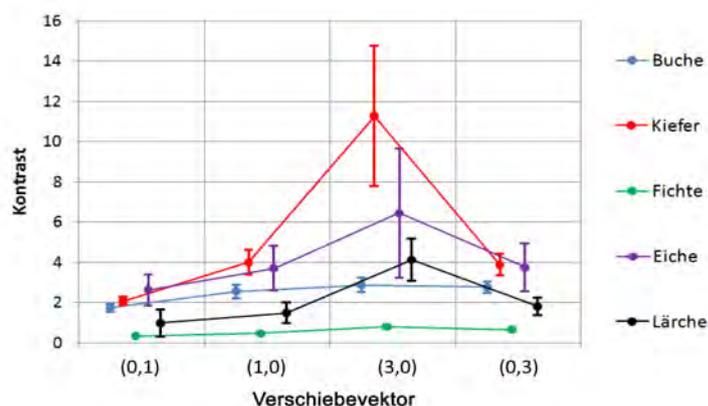


Abbildung 8.15: Ergebnisse der Kontrastberechnung mit vertikalen Verschiebevektoren ($d(0,1)$; $d(0,3)$) und horizontalen Verschiebevektoren ($d(1,0)$; $d(3,0)$) (Kretzschmar, 2009).

8.3.2 Texturmerkmale aus Frequenzspektrum

Mit Hilfe der eindimensionalen Spektralanalyse lassen sich Texturen im Frequenzbereich analysieren (Kretschmar, 2009). Variationen in der Rindenstruktur sind in einer horizontalen Bildzeile sichtbar. Abbildung 8.16 zeigt die gemittelten Bildzeilen einer Eiche eines Faro LS 880 Scanners mit einer Länge von 160 Pixeln. Die abgetragenen Grauwerte entsprechen den berechneten Verbesserungen der Laserscannerdaten zu dem ausgeglichenen Referenzzylinder. Anhand des Eingangssignals sind die einzelnen Leisten der Rinde zu erkennen. Allerdings geben das Amplitudenspektrum sowie das Leistungsspektrum keinerlei Aussagen über die Struktur der Rinde. Beispiele einer weniger stark strukturierten Rinde (Buche, Fichte) zeigen ein ähnliches Spektrum.

Anhand des Leistungsspektrums sind Ovalitäten im Stamm auszumachen. Bei der Abwicklung der Laserscannerdaten auf einen ausgleichenden Zylinder äußert sich eine Ovalität in einem sinusförmigen Kurvenverlauf. Die Ovalität wird durch ein Maximum im Leistungsspektrum bei niedrigen Frequenzen angezeigt. Zusätzlich wird die langperiodische Welle von kurzperiodischen Schwingungen überlagert, die die Rindenstruktur repräsentieren. Diese sind in höheren Frequenzbereichen wiederzufinden. Zur Analyse der Stammform sind nur Multiple-Scan-Aufnahmen geeignet, da sie den Stamm auf 360° wiedergeben.

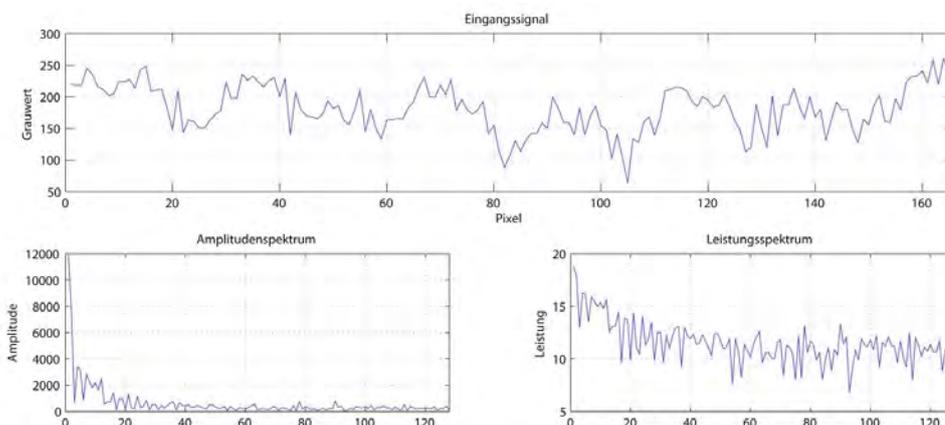


Abbildung 8.16: Eingangssignal, Amplitudenspektrum und Leistungsspektrum gemittelter Bildzeilen von abgewickelten Laserscannerpunkten einer Eiche auf einen Referenzzylinder (Single-Scan-Aufnahme) (Kretschmar, 2009).

8.3.3 Fazit

Wie die vorangegangenen Abschnitte gezeigt haben, ist die Ableitung von Texturparametern aus abgewickelten Laserscannerdaten für die Baumartenklassifizierung durchaus geeignet. Ein Vorteil der abgewickelten Daten gegenüber normalen Bilddaten ist die Beleuchtungsunabhängigkeit. Eine Analyse auf Basis von Intensitätsbildern eines Laserscans ist ebenfalls denkbar. Die Grauwerte spiegeln jedoch nicht die geometrische Beschaffenheit der Rinde wider, sondern sind entfernungs-, oberflächen- und einfallswinkelabhängig.

Aussagekräftige Texturparameter (wie z. B. Kontrast, Homogenität) ermöglichen eine Unterscheidung in wenig und stark strukturierte Rinde. Ein Großteil der Hauptbaumarten der deutschen Wälder weist ein Rindenbild mit längs der Stammachse verlaufenden Vertiefungen (Rillen, Furchen) auf. Demnach bildet eine horizontale Schicht, senkrecht zu den Furchen, die regelmäßigen Rindenstrukturen ab. Die Laserscannerdaten sollten allerdings einen Bereich abbilden, der ein Vielfaches der wiederkehrenden Rindenstruktur aufweist. Die Größe der abgewickelten Daten sollte sich hinsichtlich der Rasteranzahl und -größe nicht unterscheiden, da sonst unterschiedlich große Grauwertübergangsmatrizen entstehen und somit der Verschiebevektor mit unterschiedlichen Maßstäben belegt ist. Je nach der Form des abzubildenden Stammabschnittes und der Größe des Datenfensters bietet es sich an, die Punkte auf einen Zylinder oder eine Ebene abzuwickeln.

Auch hier ist die Wahl des Laserscanners entscheidend. Die mittlere Distanzmessgenauigkeit sollte 3 mm nicht überschreiten, da das Rauschen fälschlicherweise als Rindenstruktur interpretiert wird. Tests mit abgewickelten Punkten eines Triangulationsscanners (Microscribe/Microscan) mit einer Distanzmessgenauigkeit von 0,3 mm zeigen deutliche Verbesserungen in der Bestimmung und Klassifizierung der Grauwertbilder (Kretschmar, 2009). Geeignete Klassifikationsschemata unter Einbezug der wichtigsten Texturparameter ermöglichen eine Klassifizierung hinsichtlich einer grob- und feinstrukturierten Rinde. Triangulationsscanner sind aufgrund der Punktmessgenauigkeit einem Laserscanner mit Impuls- oder Phasenvergleichsverfahren vorzuziehen. Allerdings ist der Einsatz eines solchen Scanners aufgrund der Reichweite nicht praktikabel, da eine simultane Baumartenbestimmung aus den zur Ableitung geometrischer Baumparameter aufgenommenen Punktwolken angestrebt wird.

9 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass das terrestrische Laserscanning als dreidimensionales Messverfahren zur Ableitung forstinventurrelevanter Baum- und Bestandsparameter geeignet ist. Es zeichnet sich durch eine schnelle, genaue, berührungslose und vom Umgebungslicht unabhängige 3D-Oberflächenmessung aus. Durch die hohe Anzahl an Laserscannerpunkten ist die Basis für die automatische Ableitung geometrischer Baumparameter gegeben, was zu einer objektiven und zerstörungsfreien Bestimmung von Baumparametern führt. So kann die Stamm- oder Derbholzbiomasse am stehenden Baum noch vor dem Ernteeingriff bestimmt und der Erntevorgang sowie waldbauliche Maßnahmen gezielt geplant werden. Die vorgestellten Algorithmen enthalten Neuerungen auf dem Gebiet der Forstparameterbestimmung aus TLS-Daten. Aus wissenschaftlicher Sicht ist jedoch noch genügend Potential für weitere Entwicklungen im Bereich der Forstanwendung gegeben.

Der erste Teil der Arbeit präsentiert Algorithmen, die eine automatische Ableitung von forstinventurrelevanten Baumparametern ermöglichen. Die Basis für eine baumweise Parameterbestimmung bildet die Baumdetektion. Dazu wurden verschiedene Ansätze vorgestellt und umgesetzt, die eine Ableitung der Baumposition aus Punktwolkschichten, Entfernungsbildern oder Voxelräumen ermöglichen. Dabei können die Methoden Punktwolken verarbeiten, die von einem oder mehreren Scannerstandpunkten aus aufgenommen wurden. Die Grundlage für die weitere Parameterbestimmung ist der Baumfußpunkt, der aus der Kenntnis des angrenzenden Geländes des Baumes unter Beachtung der Geländeneigung bestimmt wird. Ausgehend von diesem Punkt ist eine automatische Baumhöhen- sowie BHD-Bestimmung möglich. Je nach Scandatensatz (Single- oder Multiple-Scan-Aufnahme) bieten sich bei der BHD-Bestimmung verschiedene Methoden an. Bei schräg stehenden Bäumen ist die BHD-Bestimmung mit einem ausgleichenden Zylinder der Kreisausgleichung vorzuziehen. Das Verfahren der konvexen Hülle bietet sich bei astfreien Stammabschnitten und einer kompletten Stammabdeckung ebenfalls an. Anhand der separierten Baumpunktwolken wird die Baumhöhe aus der Differenz der Baumspitze und des Baumfußpunktes oder über einen histogrammbasierten Ansatz ermittelt. Die wichtigsten Algorithmen wurden in einem Programm auf C++-Basis umgesetzt und ermöglichen durch Setzen externer Parameter die vollautomatische Prozessierung der Punktwolken. Zusätzlich sind weitere C++-Routinen entstanden, die zur Ergebnisanalyse eingesetzt wurden.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden Algorithmen vorgestellt, die eine Registrierung von Laserscannerdaten ermöglichen. Eine Registrierung ist durch manuelles Zuweisen der homologen Punkte mit einer Helmert-Transformation möglich. Da die Schwierigkeit besteht, im Wald homologe Punkte zuzuordnen, wurden automatische Zuordnungsmethoden vorgestellt und in einem Programm umgesetzt. Zuordnungsverfahren wie die Distanz- und Winkelmuster oder das robuste RANSAC realisieren eine erfolgreiche Punktzuordnung und Registrierung, wobei RANSAC bei größeren Punktmengen dem Distanzmuster vorzuziehen ist. Diese Methoden beschränken sich nicht nur auf extrahierte künstliche Verknüpfungspunkte, sondern werden auch zur Registrierung von ALS- und TLS-Daten erfolgreich eingesetzt. Des Weiteren wurde ein Ansatz präsentiert, der aus den Mittelpunkten der extrahierten BHD eine Datenregistrierung durchführt. Da diese lediglich eine Grobregistrierung darstellt, wird durch den anschließenden ICP-Algorithmus eine Feinregistrierung erreicht. Dazu werden Bäume mit einem ausreichend großen Überlappungsbereich in beiden Scandatensätzen automatisch detektiert und als Input im ICP-Algorithmus verwendet. Eine Registrierung über Baumachsen, generiert aus den Durchmessern der unteren Stammabschnitte und einem einzigen homologen Verknüpfungspunkt, wurde ebenfalls vorgestellt und getestet. Wie die Ergebnisse belegen, sind mit allen Methoden Registrierungen mit zufriedenstellenden Genauigkeiten möglich.

Die analysierten Punktwolken und die gezeigten Beispiele demonstrieren die Praxistauglichkeit des terrestrischen Laserscannings in forstwirtschaftlichen und forstwissenschaftlichen Fragestellungen. Je nach Distanzmessprinzip der Instrumente müssen die aufgenommenen Punktwolken von Streupunkten gefiltert werden. Im Anschluss daran sind die vorgestellten Algorithmen in der Lage, sowohl Single- als auch Multiple-Scan-Daten zu prozessieren. Nach Setzen einiger Steuerparameter werden Baum- und Bestandsparameter vollautomatisch bestimmt. Die Genauigkeiten der abgeleiteten Ergebnisse sind weitestgehend vergleichbar mit konventionell bestimmten Parametern, wobei die Güte der Baumhöhenbestimmung noch zu diskutieren wäre. Zur Verbesserung der Baumhöhenbestimmung sind kombinierte Datensätze von ALS- und TLS-Aufnahmen den reinen TLS-Daten vorzuziehen. Der RANSAC-gestützte Ansatz, der die globalen und lokalen Baumpositionen miteinander registriert, ermöglicht die kombinierte Datenauswertung. Inwieweit

der Ansatz bei regelmäßig angeordneten Bäumen einer waldbaulich angelegten Fläche erfolgreiche Registrierungen durchführt, muss anhand geeigneter Datensätze noch getestet werden.

Ein bisher unbehandelter Aspekt ist die Modellierung von Bewegungen während des Scanvorgangs. Gerade im Wald herrschen veränderliche Bedingungen, die durch Windböen Kronen- und Stammbewegung verursachen können. Sensoren zur Bestimmung von Windrichtung und -geschwindigkeit dokumentieren die vorherrschenden äußeren Bedingungen während der Scanaufnahme. Ob geeignete Modelle zur Bewegungsmodellierung eine Korrektur der Laserpunkte ermöglichen und den Einfluss kompensieren, ist in zukünftigen Arbeiten noch zu prüfen.

Hinsichtlich der Datenprozessierung wurde in der Arbeit eine Reihe von Algorithmen vorgestellt, die eine automatische Ableitung von geometrischen Bauparametern durchführen. Dennoch sind die momentane Größe und das Gewicht der Scanausrüstung für den standardmäßigen Einsatz bei Forstinventuren eher unpraktisch. Die rasante Entwicklung in der Laserscannertechnologie der letzten Jahre lässt vermuten, dass in Zukunft kompaktere, leichtere und geländefähigere Laserscanner auf den Markt kommen. Erste Modelle mit einem Gewicht von nur 5 kg (z. B. Focus^{3D} von FARO) werden bereits seit letztem Jahr angeboten.

Ein zukünftiges potientes Einsatzgebiet eines terrestrischen Laserscanners ist neben der Forstinventur im Bereich *Precision Forestry* zu sehen. Die höchsten Kosten bei der Versorgung der Sägewerke mit Holz verursachen der Erntevorgang und der Transport des Holzes von der Polterfläche zu den verarbeitenden Sägewerken. Harvester, ausgestattet mit Laserscannern, ermöglichen eine Erfassung der benachbarten Bäume (Entfernung, BHD, Position, Stammhöhe), die im Erntevorgang gezielt angefahren werden können. Einzige Voraussetzung ist dafür die Echtzeitprozessierung und -analyse der Daten. Ebenso können die Laserscanner bei der Navigation im Wald zu den Polterflächen beitragen. Über globale Baumpositionen kann die aktuelle Position des Lastkraftwagens durch Abgleich und Registrierung der lokalen Baumpositionen bestimmt werden.

Auch 3D-Kameras sind Systeme, mit denen Oberflächenpunkte gemessen werden können. Durch das kontinuierliche Aussenden von Licht im nahen Infrarotbereich lassen sich mehrere Bilder pro Sekunde aufnehmen, aus denen sich Intensitäts-, Amplituden- und Entfernungsbilder erzeugen lassen. Eventuelle Bewegungen der Baumkrone haben keinen Einfluss auf die Punkterfassung, da es sich um Momentaufnahmen handelt. Allerdings hat diese kostengünstige Alternative einen begrenzten und mit Laserscannern nicht vergleichbaren Entfernungsbereich (bis zu 10 m) und ein hohes Grundrauschen. Aktuelle Tests zeigen in den Daten einer 3D-Kamera noch deutlich erkennbare Baumstämme in Entfernungen bis maximal 3 m (Schneider et al., 2011). Um die eigentlichen Punkte auf den Stämmen von der enormen Anzahl an Streupunkten zu separieren, sind Ansätze denkbar, die detektierte Kanten aus Intensitätsbildern der Kamera in die 3D-Punktewolke zurückprojizieren. Inwieweit diese Systeme für den praktischen Einsatz im Forst geeignet sind, sollte geprüft werden. Ein weiteres System, das in Forstanwendungen an Attraktivität gewinnt, sind Drohnen (engl. *unmanned aerial vehicle* – UAV). Ausgestattet mit Kameras, können mit ihnen Bildverbände über bewaldeten Gebieten problemlos aufgenommen werden. Denkbar sind Drohnen, die mit kleinen, kompakten Laserscannern ausgestattet sind und eine Dokumentation der Kronenoberflächen durchführen.

Literaturverzeichnis

- (1) **ABMAYR, W.; 1994:** Einführung in die digitale Bildverarbeitung. Stuttgart: Teubner Verlag, S. 303.
- (2) **ADLER, P.; 2001:** Einsatz digitaler Photogrammetrie zur Beschreibung von Waldbeständen – am Beispiel der digitalen photogrammetrischen Erfassung der Level 2 Flächen Baden -Württembergs. Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg im Breisgau.
- (3) **AKCA, D.; 2003:** Full automatic registration of laser scanner point clouds. Grün, A., Kahmen, H. (Eds): Optical 3-D Measurements VI, pp. 330–337.
- (4) **ALBERTZ, J. & WIGGENHAGEN, M.; 2009:** Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. 5. Auflage, Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 334.
- (5) **AL-MANASIR, K. & FRASER, C.S.; 2006:** Registration of terrestrial laser scanner data using imagery. The Photogrammetric Record, Vol. 21 (115), pp. 255–268.
- (6) **AMTMANN R.; 1986:** Dynamische Windbelastung von Nadelbäumen. In: Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt 74.
- (7) **ANDERSEN, H.-E.; MCGAUGHEY, R. J.; REUTEBUCH, S. E.; 2005:** Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. Remote Sensing of Environment, Vol. 94 (4), pp. 441–449.
- (8) **ASCHOFF, T.; HOLDERIED, M.W.; SPIECKER, H.; 2006:** Terrestrische Laserscanner zur Untersuchung von Wäldern als Jagdlebensräume für Fledermäuse. In: Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2006, Hrsg: Luhmann, Th. & Müller, C.), Verlag Herbert Wichmann, S. 280–287.
- (9) **ASCHOFF, T. & SPIECKER, H.; 2004:** Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Freiburg, Germany, Vol. 36, Part 8/W2, pp. 71–75.
- (10) **ASCHOFF, T.; THIES, M.; WINTERHALDER, D.; KRETSCHMER, U.; SPIECKER, H.; 2004:** Automatisierte Ableitung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten. 24. Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der DGPF v. 15. bis 17. September 2004, Halle/Saale, S. 341–348.
- (11) **BAE, K.-H. & LICHTI, D. D.; 2004a:** Automated registration of unorganised point clouds from terrestrial laser scanners. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, Vol. 35, Part B5, pp. 222–227.
- (12) **BAE, K.-H. & LICHTI, D. D.; 2004b:** Edge and tree detection from three-dimensional unorganised point clouds from terrestrial laser scanners. 12th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference (ARSPC), Fremantle, Australia.
- (13) **BARAWID JR., O.C.; MIZUSHIMA, A.; ISHII, K.; NOGUCHI, N.; 2007:** Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application. Biosystems Engineering, Vol. 96 (2), pp. 139–149.
- (14) **BERALDIN, J.-A.; BLAIS, F.; LOHR, U.; 2010:** Laser scanning technology. In: Airborne and terrestrial laser scanning (Ed: Vosselman, G.; Maas, H.-G.), Whittles Publishing, pp. 1–42.
- (15) **BESL, P.J. & MCKAY, N.D.; 1992:** A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence, Vol. 14 (2), pp. 239–256.
- (16) **BHANDARKAR, S. M.; FRAUST, T. D.; TANG, M.; 1999:** CATALOG – a system for detection and rendering of internal log defects using computer tomography. Machine Vision and Applications, Vol. 11, pp. 171–190.
- (17) **BIENERT, A.; 2008:** Vectorization, edge preserving smoothing and dimensioning of profiles in laser scanner point clouds. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, Vol. 37, pp. 507–512.
- (18) **BIENERT, A. & MAAS H.-G.; 2009:** Methods for the automatic geometric registration of terrestrial laserscanner point clouds in forest stands. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Paris, France, Vol. 38, Part 3/W8, pp. 93–98.
- (19) **BIENERT, A. & SCHELLER, S.; 2008:** Verfahren zur automatischen Bestimmung von Forstinventurparametern aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, 28. DGPF-Jahrestagung Oldenburg, Band 17.
- (20) **BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, G.; MULLOOLY, G.; MOHAN, F.; 2006:** Application of terrestrial laserscanners for the determination of forest inventory parameters. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Dresden, Germany, Vol. 36, Part 5.
- (21) **BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E.; MULLOOLY, G.; MOHAN, F.; 2007a:** Automatische Erfassung forstinventur-relevanter Geometrieparameter von Waldbäumen aus terrestrischen Laserscannerdaten. In: Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2007, Hrsg: Luhmann, Th.). Verlag Herbert Wichmann, S. 216–224.

- (22) **BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E.; MOHAN, F.; NUGENT, C.; 2007b:** Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laserscanner point clouds. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Espoo, Finland, Vol. 36, Part 3/W52, pp. 50–55.
- (23) **BIENERT, A.; STIEL, B.; QUECK, R.; MAAS, H.-G.; 2010a:** Photogrammetrische Bestimmung von statischen und dynamischen Verformungsstrukturen an Einzelbäumen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN*, 5/2010, S.190–197.
- (24) **BIENERT, A.; QUECK, R.; SCHMIDT, A.; BERNHOFER, CH.; MAAS, H.-G.; 2010b:** Voxel space analysis of terrestrial laser scans in forests for wind field modelling. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Newcastle upon Tyne, UK, Vol. 38, Part 5.
- (25) **BIENERT, A.; PECH, K.; MAAS, H.-G.; 2011:** Verfahren zur Registrierung von Laserscannerdaten in Waldbeständen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, Vol. 162, 6/2011, S. 178–185.
- (26) **BITTERLICH, W.; 1952:** Die Winkelzählprobe – Ein optisches Meßverfahren zur raschen Aufnahme besonders gearteter Probeflächen für die Bestimmung der Kreisflächen pro Hektar an stehenden Waldbeständen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 71 (7-8), S. 215–225.
- (27) **BLAIR, J.B.; RABINE, D.L.; HOFTON, M.A.; 1999:** The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 54, pp. 115–122.
- (28) **BOHRER, G.; KATUL, G.G.; WALKO, R.L.; AVISSAR, R.; 2009:** Exploring the effects of microscale structural heterogeneity of forest canopies using large-eddy simulations. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 132, pp. 351–382.
- (29) **BÖHM, J.; 2005:** Modellbasierte Segmentierung und Objekterkennung aus Distanzbildern. Dissertation TU Stuttgart, Deutsche Geodätische Kommission, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Heft Nr. 583.
- (30) **BÖHM, J. & BECKER, S.; 2007:** Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans using reflectance features. 8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, pp. 338–344.
- (31) **BRADLEY, D.M.; THAYER, S.M.; STENTZ, A.; RANDER, P.; 2004:** Vegetation detection for mobile robot navigation. Technical report, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, CMU-RI-TR-04-12, Pittsburgh, PA.
- (32) **BREUER, L.; ECKHARDT, K.; FREDE, H.-G.; 2003:** Plant parameter values for models in temperature climates. *Ecological Modelling*, Vol. 169, pp. 237–293.
- (33) **BRIESE, CH.; 2010:** Extraction of digital terrain models. In: *Airborne and terrestrial laser scanning*. (Ed: Vosselman, G.; Maas, H.-G.), Whittles Publishing, pp. 135–167.
- (34) **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.
- (35) **BUCKSCH, A.; LINDENBERGH, R.C.; MENENTI, M.; 2009a:** SkelTre – fast skeletonisation for imperfect point cloud data of botanic trees. Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval (3DOR'09), Munich, 29 March 2009. Ed: I. Pratikakis, M. Spagnuolo, T. Theoharis, R. Veltkamp, pp. 13–20.
- (36) **BUCKSCH, A.; LINDENBERGH, R.C.; MENENTI, M.; RAHMAN, M.Z.; 2009b:** Skeleton-based botanic tree diameter estimation from dense LiDAR data. In: *Proc. SPIE*, Bellingham, WA, Vol. 7460, pp. 746 007.
- (37) **BUNDESANZEIGER; 2000:** Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Bundeswaldinventur II (VwV-BWI II) vom 17. Juli 2000. Hrsg. Bundesministerium der Justiz, Jahrgang 52 (146a).
- (38) **BWI, 2005:** Die zweite Bundeswaldinventur – BWI². Das wichtigste in Kürze. Hrsg. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL). S.87.
- (39) **BYRNE, J. & SINGH, S.; 1998:** Precise image segmentation for forest inventory. Technical Report CMU-RI-TR-98-14, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, May 1998.
- (40) **CESCATTI, A.; MARCOLLA, B.; 2004:** Drag coefficient and turbulence intensity in conifer canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 121, pp. 197–206.
- (41) **CHASMER, L.; BARR, A.; BLACK, A.; HOPKINSON, C.; KLJUN, N.; MCCAUGHEY, J.H.; TREITZ, P.; 2007:** Using airborne LIDAR for the assessment of canopy structure influences on CO₂ fluxes. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Espoo, Finland, Vol. 36, Part 3/W52, pp. 96–101.
- (42) **CHEN, Q.; BALDOCCHI, D.; GONG, P.; KELLY, M.; 2006:** Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint LiDAR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 72 (8), pp. 923–932.
- (43) **CHENG, Z.-L.; ZHANG, X.-P.; CHEN, B.-Q.; 2007:** Simple reconstruction of tree branches from a single range image. *Journal of Computer Science and Technology*, Vol. 22 (6), pp. 846–858.
- (44) **COUTTS, M.P. & GRACE, J.; 1995:** *WIND AND TREES*. Cambridge University Press, p. 485.

- (45) **CRAMER, A. & SCHOLZ, H.; 1997:** Messung und Sortierung von Rohholz. Staatsministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten, Freistaat Sachsen.
- (46) **CZAJA, J.; 2007:** Ein sensorgestütztes mobiles GIS am Beispiel des Nationalparks Bayerischer Wald. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München.
- (47) **DAHLEM, R.; DEHE, M.; ENGLER, C.; FIX, K.; HAGEBÖLLING, R.; HEIN, K.; LENGERT, T.; MUSCHE, F.; SCHIERENBECK, J.; SIMON, L.; WEICKEL, J.; 2002:** Streuobstwiesen – Ökologische Bedeutung, Pflege, Nutzung, Förderprogramm. Landesamt für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht, Rheinland-Pfalz, 3. überarbeitete Auflage.
- (48) **DANSON, F.M.; HETHERINGTON, D.; MORSDFORF, F.; KOETZ, B.; ALLGÖWER, B.; 2007:** Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 4 (1), pp. 157–160.
- (49) **DEAN, C.; 2003:** Calculation of wood volume and stem taper using terrestrial single-image close-range photogrammetry and contemporary software tools. *Silva Fennica*, Vol. 37 (3), pp. 359–380.
- (50) **DEHN, R.; 1987:** Eine integrierte rechnergestützte Methode zur Aufstellung lokaler Sortenmodelle am Beispiel der Baumart Fichte. Dissertation an der Universität Göttingen, Forstwissenschaftlicher Fachbereich.
- (51) **DIEDERSHAGEN, O.; KOCH, B.; WEINACKER, H.; 2003:** Automatic estimation of forest inventory parameters based on lidar, multi-spectral and fogis data. *Proceedings Optical 3D Measurement Techniques VI*, Vol. 2, Zürich. 2003.
- (52) **DIPPEL, M.; 1988:** Wuchsleistung und Konkurrenz von Buchen/Lärchen-Mischbeständen im Südniedersächsischen Bergland. Dissertation an der Georg-August-Universität Göttingen.
- (53) **DOLD, C.; 2005:** Extended Gaussian images for the registration of terrestrial scan data. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Enschede, the Netherlands, Vol. 36, Part 3/W19, pp. 180–185.
- (54) **DOLD, C.; 2010:** Ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscans. Verlag der Bayrischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C.H. Beck, Reihe C, Dissertation, Heft Nr. 646.
- (55) **DOLD, C. & BRENNER, C.; 2004:** Automatic matching of terrestrial scan data as a basis for the generation of detailed 3D city models. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Turkey, Vol. 35, Part B3, pp. 1091–1096.
- (56) **DRAKE, J.B.; DUBAYAH, R.O.; CLARK, D. B.; KNOX, R.G.; BLAIR, J.B.; HOFTON, M.A.; CHAZDON, R.L.; WEISHAMPEL, J.F.; PRINCE, S.D.; 2002:** Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 79, pp. 305–319.
- (57) **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. In: *Silvilaser 2008, the 8th International Conference on LiDAR Applications in Forest Assessment and Inventory*, Edinburgh, UK.
- (58) **DYNAWIS, 2010:** Projekthomepage des Projektes "DynaWIS". <http://www.dynawis.de> (Stand: 16.08.2010).
- (59) **FALKOWSKI, M.J.; SMITH, A.M.S.; HUDAK, A.T.; GESSLER, P.E.; VIERLING, L.A.; CROOKSTON, N.L.; 2006:** Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 32 (2), pp. 153–161.
- (60) **FARO; 2005:** Aufbruch in neue Dimensionen: Der FARO Laser Scanner LS. Datenblatt. <http://www.Faro.com> (Stand: 16.08.2005).
- (61) **FARO; 2006:** Cutting edge scanning with the FARO Laser Scanner LS. Application Case Study. FARO EUROPE GmbH & Co. KG, 2006, portal.faroeurope.com/htdocs/download.php?id=297&type=DOC (Stand: 20.11.2010).
- (62) **FEIGENWINTER, C.; BERNHOFER, C.; VOGT, R.; 2004:** The influence of advection on the short term CO₂-budget in and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 113, pp. 219–224.
- (63) **FINNIGAN, J.; SHAW, R.; PATTON, E.; 2009:** Turbulence structure above a vegetation canopy. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 637, pp. 387–424.
- (64) **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.
- (65) **FITZGIBBON, A.-W.; PILU, M.; FISHER, R.-N.; 1999:** Direct least square fitting of ellipses. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 21 (5), pp. 476–480.
- (66) **FLECK, S.; OBERTREIBER, N.; SCHMIDT, I.; BRAUNS, M.; JUNGKUNST, H.F.; LEUSCHNER, C.; 2007:** Terrestrial lidar measurements for analysing canopy structure in an old-growth forest. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Espoo, Finland, Vol. 36, Part 3/W52, pp. 125–129.
- (67) **FLECK, S.; VAN DER ZANDE, D.; SCHMIDT, M.; COPPIN, P.; 2004:** Reconstruction of tree structure from laser-scans and their use to predict physiological properties and processes in canopies. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Freiburg, Germany, Vol. 36, Part 8/W2, pp. 119–123.

- (68) **GADOW, K.V.; 2003:** Waldstruktur und Waldwachstum. Beilage zur Vorlesung im Wintersemester 2003/2004. Universitätsverlag Göttingen, S. 241.
- (69) **GAFFREY, D.; SLOBODA, B.; FABRIKA, M.; ŠMELKO, Š.; 2001:** Terrestrial single-image photogrammetry for measuring standing trees, as applied in the Dobro virgin forest. *Journal of Forest Science*, Vol. 47 (2), pp. 75–87.
- (70) **GÄRTNER, H.; 2004:** Schutzwald und Naturgefahren. Die Wurzel als Anker: Dreidimensionale Erfassung der Wurzelausbreitung unter Berücksichtigung der Holz Anatomie. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.), Forum für Wissen, S. 43–46.
- (71) **GÄRTNER, H. & DENIER, C.; 2006:** Application of a 3D Laser scanning device to acquire the structure of whole root systems- A pilot study. In: Heinrich, I., Gärtner, H., Monbaron, M. & G. Schleser (eds.) (2006): TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, Vol. 4, pp. 288–294.
- (72) **GEOSN; 2010:** Homepage des Staatsbetriebes Geobasisinformation und Vermessung Sachsen, http://www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/produkte/atkis/dgm/dgm_detail.html, (Stand: 29.06.2010)
- (73) **GORDON, B.; 2008:** Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner. Dissertation im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt.
- (74) **GORTE, B.G.H.; 2006:** Skeletonization of laser-scanned trees in the 3D raster domain. In: Innovations in 3D Geo Information Systems, Springer Berlin Heidelberg, pp. 371–380.
- (75) **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.
- (76) **GRID-ARENDAL; 2005:** Environment & Poverty Times, published by GRID-Arendal. Vol. 3, Special Edition for the World Conference on Disaster Reduction, January 18–22, Kobe, Japan.
- (77) **GRÜN, A. & AKCA, D.; 2005:** Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 59, pp. 51–174.
- (78) **GRÜN WALD, T. & BERNHOFER, C.; 2007:** A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. *Tellus B*, Vol. 59, pp. 387–396.
- (79) **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.
- (80) **HALL-BEYER, M.; 2010:** The GLCM Tutorial Home Page, <http://www.fp.ucalgary.ca/mhallbey/tutorial.htm>, Version 2.10 (Februar 2007) (Stand: 22.09.2010).
- (81) **HARALICK, R. M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEN, I.; 1973:** Textural features for image classification. In: Systems, Man and Cybernetics, *IEEE Transactions on SMC-3*, Vol. 6, pp. 610–621.
- (82) **HASEL, K. & SCHWARTZ, E.; 2002:** Forstgeschichte, Ein Grundriss für Studium und Praxis. 2. aktualisierte Auflage, Remagen: Verlag Dr. Kessel, S. 394.
- (83) **HEBERT, M. & VANDAPPEL, N.; 2003:** Terrain classification techniques from lidar data for autonomous navigation. In: Proc. Collaborative Technology Alliances Conference, May 2003.
- (84) **HELLSTRÖM, T.; LÄRKERYD, P.; NORDFJELL, T.; RINGDAHL, O.; 2009:** Autonomous forest vehicles: Historic, envisioned, and state-of-the-art. *International Journal of Forest Engineering*, Vol. 20 (1), pp. 31–38.
- (85) **HENNING, J.G. & RADTKE, P.J.; 2006a:** Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science*, Vol. 52 (1), pp. 67–80.
- (86) **HENNING, J.G. & RADTKE, P.J.; 2006b:** Ground-based laser imaging for assessing three-dimensional forest canopy structure. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 72 (12), pp. 1349–1358.
- (87) **HENNING, J.G. & RADTKE, P.J.; 2008:** Multiview range-image registration for forested scenes using explicitly matched tie points estimated from natural surfaces. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 63, pp. 68–83.
- (88) **HILLIGES, O. & BUTZ, A.; 2006:** 2D-Graphik: Klassifikation. LMU München, Medieninformatik.
- (89) **HILLMANN, M.; 2006:** Nach dem Sturm ist vor dem Sturm - Sturmschäden intelligent begegnen. Forstwirtschaft der Landwirtschaftskammer Niedersachsen.
- (90) **HOLMGREN, J. & PERSSON, Å.; 2004:** Identifying species of individual trees using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 90 (4), pp. 415–423.
- (91) **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.
- (92) **HORN, B.K.P.; 1987:** Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 4 (4), pp. 629–642.

- (93) **HOSS, H.; 1997:** Einsatz des Laser-Scanner-Verfahrens beim Aufbau des Digitalen Geländemodells (DGM) in Baden-Württemberg. *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, 1997 (2), S.131–142.
- (94) **HUANG, P. & PRETZSCH, H.; 2010:** Using terrestrial laser scanner for estimating leaf areas of individual trees in a conifer forest. *Trees*, Vol. 24, pp. 609–619.
- (95) **HUBRIG, M.; 2004:** Analyse von Tornado- und Downburst-Windschäden an Bäumen. *Forst und Holz*. Vol. 59, S. 78–84.
- (96) **HYYPÄ, J.; KELLE, O.; LEHIKONEN, M.; INKINEN, M.; 2001:** A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, pp. 969–975.
- (97) **JABLKO, P. & PERLWITZ, W.; 1997:** Baumhöhenmeßgeräte im Vergleich. *AFZ / Der Wald*. Vol. 15, S. 815–817.
- (98) **JAHN, I.; KERSTEN, T.; KINZEL, R.; 2004:** Erfahrungen mit einem 3D-Laserscanning-System bei der Erfassung einer Industrieanlage und des Lübecker Holstentores. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2004, Hrsg: Luhmann, Th.)*. Verlag Herbert Wichmann, S. 222–229.
- (99) **JÄHNE, B.; 2002:** *Digitale Bildverarbeitung*. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin: Springer Verlag, S.618.
- (100) **JING, L.; HU, B.; LI, J.; NOLAND, T.; 2010:** Delineation of individual tree crowns from small footprint, high point density LIADR data. In: *Silvilaser 2010, the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems*, Freiburg, Germany.
- (101) **JOCHEM, A.; HOLLAUS, M.; RUTZINGER, M.; HÖFLE, B.; SCHADAUER, K.; MAIER, B.; 2010:** Estimation of aboveground biomass using airborne LiDAR data. In: *Silvilaser 2010, the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems*, Freiburg, Germany.
- (102) **JOECKEL, R.; STOBER, M.; HUEP, W.; 2008:** *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*. 5. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 526.
- (103) **JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; BARET, F.; 2004:** Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 121, pp. 19–35.
- (104) **JUPP, D.L.B.; CULVENOR, D.S.; LOVELL, J.L.; NEWNHAM, G.J.; STRAHLER, A.H.; WOODCOCK, C.E.; 2008:** Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called Echidna. *Tree Physiology*, Vol. 29, pp. 171–181.
- (105) **JUTILA, J.; KANNAS, K.; VISALA, A.; 2007:** Tree measurement in forest by 2D laser scanning. *Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Jacksonville, FL, USA, June 20–23, pp. 491–496.
- (106) **KANG, Z.; ZLATANOVA, S.; GORTE, B.; 2007:** Automatic registration of terrestrial scanning data based on registered imagery. *FIG Working Week 2007, 13–17 May, 2007, Hong Kong SAR, China*.
- (107) **KEANE E.; 2007:** The potential of terrestrial laser scanning technology in pre-harvest timber measurement operations. *COFORD CONNECTS: Harvesting & Transportation No. 7*.
- (108) **KERN, F.; 2003:** *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Dissertation, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Nr. 19, Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Carlo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- (109) **KERN, F.; SIEGRIST, B.; HUXHAGEN, U.; MEHLIG, S.; 2010:** Genauigkeitsvergleich verschiedener Zielmarkendesigns. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN 5/2010*, S. 170–175.
- (110) **KIRÁLY, G. & BROLLY, G.; 2007:** Tree height estimation methods for terrestrial laser scanning in a forest reserve. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Espoo, Finland, Vol. 36, Part 3/W52, pp. 211–215.
- (111) **KNUCHEL, H.; 1947:** *Holzfehler*. Zürich: Werner Classen Verlag, S. 119.
- (112) **KOCH, B.; HEYDER, U.; WEINACKER, H.; 2006:** Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 72 (4), pp. 357–363.
- (113) **KOCH, B.; SVOBODA, J.; ADLER, P.; DEES, M.; 2002:** Automatische Baumartenerkennung auf der Grundlage digitaler CIR-Luftbilder. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, Vol. 173 (7/8), S. 131–140.
- (114) **KORTH, W. & RESNIK, B.; 2005:** Mobile Geodatenerfassung mit Handheld-GPS-Empfängern - Probleme und Lösungsansätze. In: *Chesi/Weinold (Hrsg) 13. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl*, Wichmann Verlag, S. 82–92.
- (115) **KRAMER, H. & AKÇA, A.; 2008:** *Leitfaden zur Waldmesslehre*. 5. überarbeitete Auflage, Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag, S. 226.
- (116) **KRAUS, H.; 2008:** *Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 214.

- (117) **KRAUS, K.; 2004:** Photogrammetrie 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7. Auflage, Walter de Gruyter, S. 516.
- (118) **KRAUS, K. & PFEIFER, N.; 1998:** Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53, pp. 193–203.
- (119) **KRAUS, K. & PFEIFER, N.; 2002:** Advanced DTM generation from Lidar data. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Annapolis, MD, USA, Vol. 34, Part 3/W4, pp. 23–35.
- (120) **KRETZSCHMAR, A.; 2008:** Untersuchungen zu Genauigkeiten bei der Ableitung von Baumparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten. Studienarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- (121) **KRETZSCHMAR, A.; 2009:** Entwicklung eines Verfahrens zur Erkennung von Baumarten aus Texturmaßen von Laserscannerdaten der Baumrinde. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- (122) **KUCHENBECKER, D.; 2011:** Untersuchung und Validierung zur Extraktion des Brusthöhendurchmessers aus terrestrischen Laserscannerpunktswolken. Studienarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- (123) **KUTTERER, H.; 2010:** Mobile Mapping. In: *Airborne and terrestrial laser scanning* (Ed: Vosselman, G.; Maas, H.-G.), Whittles Publishing, pp. 293–311.
- (124) **LANGETEPE, E. & ZACHMANN, G.; 2006:** Geometric data structures for computer graphics. A K Peters (Ltd.), p. 376.
- (125) **LALONDE, J.-F.; VANDAPPEL, N.; HUBER, D.F.; HEBERT, M.; 2006:** Natural terrain classification using three-dimensional lidar data for ground robot mobility. *Journal of Field Robotics*, Vol. 23 (10), pp. 839–861.
- (126) **LAURENTINI, A.; 1994:** The visual hull concept for silhouette-based image understanding. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16 (2), pp. 150–162.
- (127) **LEHMANN, T.; OBERSCHELP, W.; PELIKAN, E.; REPGES, R.; 1997:** Bildverarbeitung für die Medizin – Grundlagen, Modelle, Methoden, Anwendung. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 462.
- (128) **LEMMENS, M.; 2009a:** Terrestrial Laser Scanners – Product Overview. GIM International, August, 2009.
- (129) **LEMMENS, M.; 2009b:** 3D Laser Scanner Software – Product Survey. GIM International, September, 2006.
- (130) **LI, Z.; HUANG, H.; GONG, P.; 2010:** Automatic registration of multi-scan terrestrial LiDAR data of forests with stem features. In: *Silvilaser 2010, the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems*, Freiburg, Germany.
- (131) **LIM, E.H. & SUTER, D.; 2009:** 3D terrestrial LIDAR classifications with super - voxels and multi-scale Conditional Random Fields. *Computer-Aided Design*, Vol. 41 (10), pp. 701–710.
- (132) **LOUDERMILK, E.L.; SINGHANIA, A.; FERNANDEZ, J.C.; HIERS, J.K.; O'BRIEN, J.J.; CROPPER JR., W.P.; SLATTON, K.C.; MITCHELL, R.J.; 2007:** Application of ground-based lidar for fine-scale forest fuel modelling. In: *Butler, Bret W.; Cook, Wayne, comps. 2007. The fire environment-innovations, management, and policy; conference proceedings. 26-30 March 2007; Destin, FL. Proceedings RMRS-P-46CD*, pp. 515–523.
- (133) **LOWE, D.G.; 1999:** Object recognition from local scale-invariant features. In: *International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece, pp. 1150–1157.
- (134) **LUHMANN, T.; 2003:** Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 2. Auflage, Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 571.
- (135) **LUXSCAN; 2009:** LuxScan Technologies – Scanner für die Holzindustrie. Broschüre der LuxScan Technologies. Online verfügbar: http://www.luxscan.lu/mmp/online/website/content/downloads/139_/file_243/luxscan_broschue_allemand.pdf (Stand 17.09.2009).
- (136) **MAAS, H.-G.; 1999:** Closed solutions for the determination of parametric building models from invariant moments of airborne laserscanner data. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Munich, Germany, Vol. 32, Part 3-2W5, pp. 193–199.
- (137) **MAAS, H.-G.; 2005:** Akquisition von 3D-GIS Daten durch Flugzeuglaserscanning. *Kartographische Nachrichten* (Heft 1), S. 3–11.
- (138) **MAAS, H.-G.; 2010:** Forestry applications. In: *Airborne and terrestrial laser scanning* (Ed: Vosselman, G.; Maas, H.-G.), Whittles Publishing, pp. 213–235.
- (139) **MAAS, H.-G.; BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E.; 2008:** Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29 (5), March 2008, pp. 1579–1593.
- (140) **MAHLER, G.; WILLMANN, U.; WURSTER, M.; 2001:** Güteansprache am stehenden Stamm - Bundeswaldinventur II in Baden-Württemberg. Hrsg.: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Online verfügbar: http://www.fva-bw.de/forschung/bwi_gueteanspr/arbeitseanweisung.pdf (Stand: 23.09.2010).
- (141) **MAYER, H.; 1985:** Baumschwingungen und Sturmgefährdung des Waldes. Universität München, Meteorologisches Institut, Wissenschaftliche Mitteilungen 51.

- (142) MEIERHOLD, N.; SPEHR, M.; SCHILLING, A.; GUMHOLD, S.; MAAS, H.-G.; 2010: Automatic feature matching between digital images and 2D representations of a 3D laser scanner point cloud. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Newcastle upon Tyne, UK, Vol. 38, Part 5, pp. 446–451.
- (143) METTENLEITER, M.; OBERTREIBER, N.; HÄRTL, F.; EHM, M.; BAUR, J.; FRÖHLICH, C.; 2008: 3D laser scanner as part of kinematic measurement systems. 1st International Conference on Machine Control & Guidance 2008.
- (144) MICHEL, P.; JENKINS, J.; MASON, N.; DICKINSON, K.J.M.; JAMIESON, I.G.; 2008: Assessing the ecological application of lasergrammetric techniques to measure fine-scale vegetation structure. Ecological Informatics, Vol. 3 (4-5), pp. 309–320.
- (145) MOORTHY, I.; MILLER, J.R.; BERNI, J.A.J.; ZARCO-TEJADA, P.; HU, B.; CHEN, J.; 2010: Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data. Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 151 (2), 2011, pp. 204–214.
- (146) NÆSSET, E.; 1997a: Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 52, pp. 49–56.
- (147) NÆSSET, E.; 1997b: Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. Remote Sensing of Environment, Vol. 61, pp. 246–253.
- (148) NÆSSET, E.; 2004: Estimation of above- and below-ground biomass in boreal forest ecosystems. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Freiburg, Germany, Vol. 36, Part 8/W2, pp. 145–148.
- (149) NAVLOG; 2011: Ohne Umwege durch den Wald. NavLog-Broschüre, NavLog GmbH, <http://www.navlog.info/>, (Stand 17.01.2011).
- (150) NESTLER, R. & FRANKE, K.-H.; 2000: Realisierung eines multisensorischen Ansatzes zur Oberflächeninspektion von Holz. 6. Workshop Farbbildverarbeitung, Berlin, S. 89–96.
- (151) NIEMEIER, W.; 2008: Ausgleichsrechnung – statistische Auswertemethoden. 2. Auflage, Berlin: Walter de Gruyter Verlag, S. 493.
- (152) NISCHWITZ, A.; FISCHER, M.; HABERÄCKER, P.; 2007: Computergrafik und Bildverarbeitung. 2. Auflage, Wiesbaden: Vieweg Verlag, S. 873.
- (153) OJA, J.; 2000: Evaluation of knot parameters measured automatically in CT-images of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst). Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 58 (5), pp. 375–379.
- (154) OLIVIER, J.L. & OZGUNER, F.; 1986: A navigation algorithm for an intelligent vehicle with a laser rangefinder. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 1145–1150.
- (155) PÁL, I.; 2008: Measurements of forest inventory parameters on terrestrial laser scanning data using digital geometry and topology. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, Vol. 37, Part B3b, pp. 373–380.
- (156) PECH, K.; 2010: Untersuchungen zur integrierten Auswertung von terrestrischen und Flugzeuggestützten Laserscannerdaten für die Bestimmung von Forstbestandsdaten. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- (157) PERSSON, Å.; 2001: Extraction of individual trees using laser radar data. Master Thesis EX013, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- (158) PERSSON, Å.; HOLMGREN, J.; SÖDERMAN, U.; OLSSON, H.; 2004: Tree species classification of individual trees in sweden by combining high resolution laser data with high resolution near-infrared digital images. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Freiburg, Germany, Vol. 36, Part 8/W2, pp. 204–207.
- (159) PFEIFER, N.; 2005: Oberflächenmodelle aus Laserdaten. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI) Heft 4/2003, S. 243–252.
- (160) PFEIFER, N.; GORTE, B.G.H.; WINTERHALDER, D.; 2004: Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, Vol. 35, Part B5, pp. 114–119.
- (161) PFENNIGBAUER, M.; RIEGER, P.; STUDNICKA, N.; ULLRICH, A.; 2009: Detection of concealed objects with a mobile laser scanning system. In: Monte D. Turner; Gary W. Kamerman (Editor). Proceedings SPIE Laser Radar Technology and Applications XIV, Vol. 7323, May.
- (162) POPESCU, S.C.; WYNNE, R.H.; 2004: Seeing the trees in the forest: Using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 70 (5), pp. 589–604.
- (163) PRETZSCH, H.; SEIFERT, S.; HUANG, P.; 2011: Beitrag des terrestrischen Laserscannings zur Erfassung der Struktur von Baumkronen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, Vol. 162 /6, S. 186–194.

- (164) **PYYSALO, U.; 2004:** Tree crown determination using terrestrial imaging for laser scanned individual tree recognition. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, Vol. 35, Part B3, pp. 225–230.
- (165) **QUECK, R.; BIENERT, A.; HARMANSA, S.; GOLDBERG, S.; MAAS, H.-G.; BERNHOFER, CH.; 2012:** Wind fields in heterogeneous conifer canopies: Parameterisation of momentum absorption using high-resolution 3D vegetation scans. European Journal of Forest Research, Vol. 131, pp. 165–176.
- (166) **RABBANI, T.; DIJKMAN, S.; VAN DEN HEUVEL, F.; VOSSELMAN, G.; 2006:** An integrated approach for modelling and global registration of point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 61 (6), pp. 355–370.
- (167) **RABBANI, T. & VAN DEN HEUVEL, F.; 2005:** Efficient hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Enschede, The Netherlands, Vol. 36, Part 3/W19, pp. 60–65.
- (168) **RADLOFF, W.; 2010:** Laser in Wissenschaft und Technik. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, S. 153.
- (169) **RAHMAN, M.Z.A. & GORTE B.G.H.; 2009:** Tree crown delineation from high resolution airborne lidar based on densities of high points. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Paris, France, Vol. 38, Part 3/W8, pp. 123–128.
- (170) **REISSMANN, G.; 1980:** Die Ausgleichsrechnung - Grundlagen und Anwendung in der Geodäsie. 5. Auflage, Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, S. 368.
- (171) **REITBERGER, J.; 2010:** 3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Kartographie, Technische Universität München.
- (172) **REITBERGER J.; HEURICH M.; KRZYSZEK P.; STILLA U.; 2007:** Single tree detection in forest areas with high-density LiDAR data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Munich, Germany, Vol. 36, Part 3/W49B, pp. 139–144.
- (173) **REITBERGER, J.; SCHNÖRR, CL.; HEURICH, M.; KRZYSZEK, P.; STILLA, U.; 2008:** Towards 3D mapping of forest: a comparative study with first / last pulse and full waveform lidar data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, Vol. 37, Part B8, pp. 1397–1403.
- (174) **REULKE, R. & HAALA, N.; 2005:** Tree species recognition with fuzzy texture parameters. In: Combinatorial Image Analysis, Springer Verlag Berlin / Heidelberg, pp. 607–620.
- (175) **RIEGER, P.; STUDNICKA, N.; PFENNIGBAUER, M.; ZACH, G.; 2010:** Boresight alignment method for mobile laser scanning systems. In: Journal of Applied Geodesy, de Gruyter, Vol. 4 (1), 2010, pp. 13–21.
- (176) **RIEGL, 2009:** Long range & high accuracy 3D terrestrial laser scanner system – LMS-Z420i. Datenblatt LMS-Z420i. <http://www.riegl.com/> (Stand: 09.12.2009).
- (177) **RIEGL, 2010:** Airborne laser scanner for full waveform analysis – LMS-Q560 . Datenblatt LMS-Q560. <http://www.riegl.com/> (Stand: 30.04.2010).
- (178) **ROLOFF, A.; 2010:** Bäume: Lexikon der praktischen Baumbiologie. 2., völlig neu überarbeitete Auflage, Weinheim: Verlag Wiley-VCH, S. 207.
- (179) **RÖSSLER, G.; 2000:** Höhenmeßverfahren auf Dauerversuchsflächen. Online Publikation <http://bfw.ac.at/100/1232.html> (Stand: 01.09.2010).
- (180) **ROSSMANN, J.; KRAHWINKLER, P.; SCHLETTE, C.; 2010:** Navigation of mobile robots in natural environments: Using sensor fusion in forestry. The Journal on Systemics, Cybernetics and Informatics (JSCI), Vol. 8 (3), pp. 67–71.
- (181) **ROSSMANN, J.; SCHLUSE, M.; BÜCKEN, A.; 2007:** Bringing laser-scanning into the forest: New approaches to single-tree delineation as a support tool for forestry management applications. In: Mills, John & Williams, Meredith (Eds): Proceedings of the 2007 Annual Conference of the Remote Sensing and Photogrammetry Society (RSPSoc 2007), TS 2 - Forestry, 11–14 September, Newcastle University.
- (182) **RUTZINGER, M.; PRATHAST, A. K.; OUDE ELBERINK, S.; VOSSELMAN, G.; 2010:** Detection and modelling of 3d trees from mobile laser scanning data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Newcastle upon Tyne, UK, Vol. 38, Part 5, pp. 520–525.
- (183) **SALI, E. & WOLFSON, H.; 1992:** Texture classification in aerial photographs and satellite data. International Journal of Remote Sensing, Vol. 13 (18), pp. 3395–3408.
- (184) **SHELLER, S.; 2005:** Objektmodellierung unter Nutzung von Profilen aus Punktwolken terrestrischer Laserscannerdaten. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, 2005.

- (185) SCHELLER, S. & SCHNEIDER, D.; 2006: Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktewolken zur Rekonstruktion von Tragwerken. In: Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2006, Hrsg.: Th. Luhmann), Verlag Herbert Wichmann, S. 156–163.
- (186) SCHILLING, A.; SCHMIDT, A.; MAAS, H.-G.; 2011a: Automatic tree detection and diameter estimation in terrestrial laser scanner point clouds. Eds: Wendel, A., Sternig, S., Godec, M., 16th Computer Vision Winter Workshop. Mitterberg, February 2–4, 2011, Austria, pp. 75–82.
- (187) SCHILLING, A.; SCHMIDT, A.; MAAS, H.-G.; WAGNER, S.; 2011b: Topology extraction using depth first search on voxel representations of tree point clouds. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Calgary, Canada, Vol. 38, Part 5/W12, pp. 85–90.
- (188) SCHLEGEL, F.; STILLER, J.; BIENERT, A.; MAAS, H.-G.; QUECK, R.; BERNHOFER, CH.; 2012: LES of inhomogeneous canopy flows using high resolution terrestrial laser scanning data. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 142 (2), pp. 223–243.
- (189) SCHMIDT, A.; 2010: Entwicklung von Bildanalyseverfahren zur Bestimmung von Strömungsbeiwerten in Waldgebieten auf Voxelrepräsentationen terrestrischer Laserscannerdaten. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- (190) SCHMIDTKE, H. & SCHERRER, H.U.; 1997: Sturmschäden im Wald. [Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", NFP31], Zürich:vdf, Hochsch.-Verl. An der ETH, 1997.
- (191) SCHNEIDER, D.; 2009: Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden.
- (192) SCHNEIDER, D.; BIENERT, A.; SCHULZE, M.; SCHILLING, A.; SCHMIDT, A.; 2011: NAVKE. Interner Forschungsbericht zur Navke-Studie 2011 (unveröffentlicht).
- (193) SCHÜTT, C.; ASCHOFF, T.; WINTERHALDER, D.; THIES, M.; KRETSCHMER, U.; SPIECKER, H.; 2004: Approaches for recognition of wood quality of standing trees based on terrestrial laser-scanner data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Freiburg, Germany, Vol. 36, Part 8/W2, pp. 179–182.
- (194) SCHÜTT, C.; BRAUN, E.; KÜMMERER, A.; THIES, M.; SPIECKER, H.; 2005: Einschätzung der Holzqualität an stehenden Bäumen. *AFZ-Der Wald*, 6/2005, S. 283–287.
- (195) SCHWALBE, E.; MAAS, H.-G.; DIETRICH, R.; EWERT, H.; 2008: Glacier velocity determination from multi-temporal terrestrial long range laserscanner point clouds. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, Vol. 37, Part B5, pp. 457–462.
- (196) SCHWALBE, E.; MAAS, H.-G.; KENTER, M.; WAGNER, S.; 2009: Hemispheric image modelling and analysis techniques for solar radiation determination in forest ecosystems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 75 (4), pp. 375–384.
- (197) SHLYAKHTER, I.; ROZENOER, M.; DORSEY, J.; TELLER, S.; 2001: Reconstructing 3d tree models from instrumented photographs. *IEEE Computer Graphics and Applications* 21, 3 (May/June), pp. 53–61.
- (198) SIMONSE, M.; ASCHOFF, T.; SPIECKER, H.; THIES, M.; 2003: Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning. *Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*, Umeå, Sweden, pp. 251–257.
- (199) SINN, G; 2003: Baumstatik: Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen an Straßen, in Parks und der freien Landschaft. Braunschweig: Thalacker Medien.
- (200) SPANK, U.; 2010: Site water budget: Influences of measurement uncertainties on measurement results and model results. Dissertation, Technische Universität Dresden, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-62557>
- (201) SPÄTH, H.; 2000: Ein Verfahren zur Bestimmung des Least Squares Zylinders. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN* 107, S. 65–67.
- (202) SPRINGER; 2011: Wie Scannertechnologien die Entwicklung moderner Anlagenkonzepte beeinflussen. Firmenzeitung der Springer Maschinenfabrik AG, Nr. 05 / April 2007, Online verfügbar: www.springer.eu/fileadmin/downloads/zeitung_de/News_05_D.pdf (Stand 19.03.2011)
- (203) STAIGER, R.; 2003: Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications. In: 2nd FIG Regional Conference Marrakech (Morocco), TS 12.3, Online verfügbar: http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS12/TS12_3_staiger.pdf (Stand: 08.03.2011).
- (204) STAMOS, I. & LEORDEANU, M.; 2003: Automated feature-based range registration of urban scenes of large scale. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. II, IEEECS Press 2003, pp. 555–561.

- (205) **STEPHENS, P.R.; WATT, P.J.; LOUBSER, D.; HAYWOOD, A.; KIMBERLEY, M.O.; 2007:** Estimation of carbon stocks in new zealand planted forests using airborne scanning lidar. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Espoo, Finland, Vol. 36, Part 3/W52, pp. 389–394.
- (206) **STIEL, B.; 2010:** Untersuchungen zur Anwendung photogrammetrischer Verfahren zur Bestimmung von statischen und dynamischen Verformungsstrukturen von Einzelbäumen. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- (207) **STILLA, U.; JUTZI, B.; REITBERGER, J.; YAO, W.; KRZYSZEK, P.; 2009:** Full Waveform Laserscanning – Auswertemethoden und Anwendungen. Terrestrisches Laserscanning TLS 2009, Schriftenreihe des DVW (Band 60) S. 49–67.
- (208) **STRAHLER, A. H.; JUPP, D. L. B.; WOODCOCK, C. E.; SCHAAF, C. B.; ETC.; 2008:** Retrieval of forest structural parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna). Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 34 (2), pp. 426–440.
- (209) **TEOBALDELLI, M.; ZENONE, T.; PUIG, D.; MATTEUCCI, M.; SEUFERT, G.; SEQUEIRA, V.; 2007:** Structural tree modelling of aboveground and belowground poplar tree using direct and indirect measurements: Terrestrial Laser Scanning, WGROGRA, AMAPmod and JRC-3D Reconstructor®. 5th International Workshop on Functional Structural Plant Models, New Zealand, November 4–9, 2007, pp. 20-1 – 20-4.
- (210) **THIES, M.; ASCHOFF, T.; SPIECKER, H.; 2003:** Terrestrische Laserscanner im Forst. AFZ-DerWald, 22/2003, S. 1126–1129.
- (211) **THIES, M.; PFEIFER, N.; WINTERHALDER, D.; GORTE, B.G.H.; 2004:** Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees. Scandinavian Journal of Forest Research, Vol. 19, 2004, pp. 571–581.
- (212) **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.
- (213) **THOMAS, L.; MILL, L.; THOMAS, E.; SHAFFER, C.A.; 2006:** Defect detection on hardwood logs using laser scanning. Wood and Fiber Science, Vol. 38 (4), 2006, pp. 682–695.
- (214) **THURSTON, J.; 2006:** Review: Laser technology – criterion RD 1000. Geo: Geoconnexion International Magazin, Vol. 5 (7), 2006, pp. 39–40.
- (215) **TIEDE, D.; HOCHLEITNER, G.; BLASCHKE, T.; 2005:** A full GIS based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vienna, Austria, Vol. 36, Part 3/W24, pp. 9–14.
- (216) **TREEMETRICS; 2010:** Internetseite von TreeMetrics, <http://www.treemetrics.com> (Stand: 24.08.2010).
- (217) **VAUHKONEN, J.; ENE, L.; GUPTA, S.; HEINZEL, J.; HOLMGREN, J.; PITKÄNEN, J.; SOLBERG, S.; WANG, Y.; WEINACKER, H.; HAUGLIN, K.M.; LIEN, V.; PACKALÉN, P.; GOBAKKEN, T.; KOCH, B.; NAESSET, E.; TOKOLA, T.; MALTAMO, M.; 2010:** Comparative testing of single-tree detection algorithms. In: Silvilaser 2010, the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, Freiburg, Germany.
- (218) **VAUCHER, H.; 1990:** Baumrinden. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, S. 255.
- (219) **VOCK, D.M.M.; GUMHOLD, S.; SPEHR, M.; WESTFELD, P.; MAAS, H.G.; 2010:** Gpu-based volumetric reconstruction of trees from multiple images. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Newcastle upon Tyne, UK, Vol. 38, Part 5, pp. 586–591.
- (220) **VOSSelman, G.; 2000:** Slope based filtering of laser altimetry data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Amsterdam, The Netherlands, Vol. 33, Part B3/(1+2), pp. 935–942.
- (221) **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.
- (222) **VOSSelman, G. & MAAS, H.-G.; 2010:** Airborne and terrestrial laser scanning. Dunbeath: Whittles Publishing, p. 336.
- (223) **WAGNER, S. & HAGEMEIER, M.; 2006:** Method of segmentation affects leaf inclination angle estimation in hemispherical photography. Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 139, pp. 12–24.
- (224) **WAGNER, W.; ULLRICH, A.; BRIESE, C.; 2003:** Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, VGI 4/2003, S. 223–235.
- (225) **WAGNER, W.; ULLRICH, A.; MELZER, T.; BRIESE, C.; KRAUS, K.; 2004:** From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, Vol. 35, Part B3, pp. 201–206.

- (226) **WALKLATE, P. J.; CROSS, J. V.; RICHARDSON, G. M.; MURRAY, R.A.; BAKER, D. E.; 2002:** Comparison of different spray volume deposition models using LIDAR measurements of apple orchards. *Biosystems engineering*, Vol. 82 (3), pp. 253–267.
- (227) **WANG, Y.; WEINACKER, H.; KOCH, B.; STERENCZAK, K.; 2008:** Lidar point cloud based fully automatic 3D single tree modelling in forest and evaluations of the procedure. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, Vol. 37, Part B6b, pp. 45–52.
- (228) **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.
- (229) **WEISS, J.; 2009:** Application and statistical analysis of terrestrial laser scanning and forest growth simulations to determine selected characteristics of Douglas-Fir stands. *Folia Forestalia Polonica, series A*, Vol. 51 (2), pp. 123–137.
- (230) **WEVER, C.; 2002:** Airborne Laser Scanning Verfahren und Genauigkeiten. „Laserscanning – ein Verfahren zur Erfassung von hochgenauen Oberflächenmodellen“. eine Veranstaltung des Fachforum VoGIS, Feldkirch. Online verfügbar: http://www.vorarlberg.at/pdf/vortrag_wever_23_09.pdf (Stand: 27.01.2009).
- (231) **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.
- (232) **WILKE, W.; 2002:** Segmentierung und Approximation großer Punktwolken. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Mathematik.
- (233) **WITTSHECK, W.; 2010:** Untersuchung zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der interaktiven Bestimmung von Baumarten und Baumparametern aus Flugzeuglaserscannerdaten und Orthophotos. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- (234) **WOODEYE; 2011:** Internetseite der WoodEye Scannersysteme GmbH <http://www.woodeyeinc.com> (Stand: 19.03.2011).
- (235) **XIAO, X.; 1998:** A multiple sensors approach to wood defect detection. Dissertation, Faculty of Bradley Department of Electrical Engineering of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1998.
- (236) **YANG, B.; MORSE, A.; SHAW, R.U.K.; 2006a:** Large-eddy simulation of turbulent flow across a forest edge. PartII: momentum and turbulent kinetic energy budgets. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 121 (3), pp. 433–457.
- (237) **YANG, B.; RAUPACH, M.; SHAW, R.U.K.; MORSE, A.; 2006b:** Large-eddy simulation of turbulent flow across a forest edge. PartI: flow statistics. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 120 (3), pp. 377–412.
- (238) **YU, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, H.; MALTAMO, M.; RÖNNHOLM, P.; 2005:** Measuring the growth of individual trees using multi-temporal airborne laser scanning point clouds. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Enschede, the Netherlands, Vol. 36, Part 3/W19, pp. 204–208.
- (239) **YU, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; MALTAMO, M.; 2004:** Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* (90), pp. 451–462.
- (240) **ZHAO, K. & POPESCU, S.; 2007:** Hierarchical watershed segmentation of canopy height model for multi-scale forest inventory. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Espoo, Finland, Vol. 36, Part 3/W52, pp. 436–445.
- (241) **ZHU, C.; ZHANG, X.; HU, B.; JAEGER, M.; 2008:** Reconstruction of tree crown shape from scanned data. *Proceeding Edutainment '08, Proceedings of the 3rd international conference on Technologies for E-Learning and Digital Entertainment*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- (242) **ZIEGLER, A.; KOCH, R.; BOBEY, K.; BOMBOSCH, F.; 2010:** Echtzeit und Embedded - Algorithmen und Sensorsystem für die dynamische Waldinventur. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN 5/2010*, S. 182–189.
- (243) **ZÖHRER, F.; 1980:** Forstinventur: Ein Leitfaden für Studium und Praxis. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey, S. 207.
- (244) **ZUNDEL, R.; 1990:** Einführung in die Forstwissenschaft. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, S. 359.

Abkürzungen

2D / 3D / 4D	Zweidimensional / Dreidimensional / Vierdimensional
ALS	Airborne Laserscanning
ASTW	Anker Station Tharandter Wald
ATV	All Terrain Vehicle
BHD	Brusthöhendurchmesser
BWI	Bundeswaldinventur
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
CT	Computertomograph
DGM	Digitales Geländemodell
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
DKM	Digitales Kronenmodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
engl.	englisch
EU	Europäische Union
EVI	ECHIDNA® Validation Instrument
FPE	First Pulse Echo
FWA	Full-Waveform-Analyses
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GPS	Globales Positionierungssystem
ICP	Iterative Closest Point
INS	Inertiales Navigationssystem
IPF	Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
LAD	leaf area density
LAI	leaf area index
LPE	Last Pulse Echo
LVIS	Laser-Vegetation-Imaging-Sensor
MLS	Mobile Laserscanning
NASA	National Aeronautics and Space Administration
nDKM	normiertes Digitales Kronenmodell
NDVI	Normalised Difference Vegetation Index
NIR	nahes Infrarot
PAD	plant surface area density
PC	Personal Computer
RANSAC	Random Sample Consensus

RGB	rot-grün-blau
RMS	Root Mean Square
SIFT	Scale-invariant feature transform
TIN	Triangulated Irregular Network
TLS	Terrestrisches Laserscanning
UAV	unmanned aerial vehicle
VP	Verknüpfungspunkt
VRML	Virtual Reality Modelling Language
WLAN	Wireless Local Area Network
WST	Wasserscheidentransformation
WZP	Winkelzählprobe

Formelzeichen

Dieses Verzeichnis beinhaltet die wichtigsten Formelzeichen die in der Arbeit verwendet wurden. Weitere Formelzeichen die Verwendung fanden, werden an der jeweiligen Stelle im Text definiert.

a	Abstand
a, b, c, d	Quaternionen zur Beschreibung einer räumlichen Rotation
A	Koeffizientenmatrix
C	Grauwertübergangsmatrix
d	Durchmesser
D	Distanzkombinationsmatrix
g	Grauwert
h	Höhe
H	Homologiematrix
i, j, k	Inkrement (unterschiedliche Verwendung)
k_{ah}	Kronenansatzhöhe
k_b	Kronendurchmesser / breite
k_l	Kronenlänge
k_r	Kronenradius
k_s	Kronenschirmfläche
K_t	turbulente kinetische Energie
k_u	Kronenumfang
l	Beobachtungsvektor
m	Maßstab
n	Anzahl
N	Datenmenge
p	Modellparameter
P_d	Qualitätsmaß
P_{total}	Reflexionswahrscheinlichkeit
r	Radius
s	Horizontaldistanz
sh	Schichthöhe
t	Toleranz
U	mittlere Geschwindigkeit in Strömungsrichtung
u	Umfang
v	Verbesserungsvektor
v_N	Geländeneigung

w	Gewicht
X, Y, Z	kartesische Koordinaten im Objektkoordinatensystem
x, y	Bildkoordinaten
\mathbf{x}_k	Eigenvektor
λ_k	Eigenwerte
α	Azimut
μ	Zentriwinkel
σ	Standardabweichung
$\hat{\sigma}$	a posteriori Standardabweichung (ausgegliche Standardabweichung)
σ_0	Standardabweichung der Gewichtseinheit
Σ	Ebene
ω, φ, κ	Drehwinkel um die X-, Y- und Z-Achse

Abbildungsverzeichnis

Die in der Arbeit gezeigten Abbildungen sind, sofern sie von einem anderen Urheber stammen mit der Quellenangabe versehen, andernfalls bin ich die Erstellerin der Abbildungen.

Abbildung 1.1: Prinzip des Flugzeuglaserscannings und des Mobile Laserscannings.....	12
Abbildung 1.2: Übersicht der Einsatzgebiete von terrestrischen Laserscannern im Forst.....	16
Abbildung 2.1: Profil eines ALS-Datensatzes eines Laubwaldbestandes.....	21
Abbildung 2.2: Prinzip des Flugzeuglaserscannings: diskrete Echos; Full-Waveform-Digitisation.....	22
Abbildung 2.3: 2D-Intensitätsbilder von Scannern unterschiedlicher Sichtfelder.....	23
Abbildung 2.4: Einfluss der Strahldivergenz bei der Oberflächenmessung am Stamm.....	24
Abbildung 2.5: Das sichtbare Stammsegment in Abhängigkeit von der Entfernung und dem BHD.....	25
Abbildung 2.6: Multiple-Scan mit drei Aufnahmestandpunkten in der Draufsicht und Seitenansicht.....	26
Abbildung 2.7: Zielmarkendesigns.....	27
Abbildung 2.8: Prinzip der Registrierung anhand eines Forstplots mit vier Standpunkten.....	28
Abbildung 2.9: Distanzmuster von sechs homologen Punkten aus Scan 1 und Scan 2.....	30
Abbildung 2.10: Prinzip der Helmert-Transformation.....	31
Abbildung 2.11: Verschiedene Punktwolkendarstellungen.....	33
Abbildung 2.12: Definition eines Voxelraums.....	36
Abbildung 2.13: Voxelräume verschiedener Auflösungen: a) Punktwolke; b) 10 cm; c) 50 cm; d) 1 m).....	36
Abbildung 2.14: Prozesskette des optimierten Holzzuschnittes.....	40
Abbildung 3.1: Prinzip der Stichprobeninventur.....	43
Abbildung 3.2: Durchmessererfassung mit Kluppe und mit Umfangmessband.....	43
Abbildung 3.3: Auswirkung der Baumhöhe bei Schrägstand; Prinzip der trigonometrischen Höhenmessung.....	44
Abbildung 3.4: Kronenparameter.....	46
Abbildung 3.5: Kronenspiegel.....	46
Abbildung 4.1: Studiengebietsverteilung im Tharandter Wald; Buchenbestand, Fichtenbestand.....	49
Abbildung 4.2: Fichtenbestand und Wildacker; Laserscanner Riegl LMS-Z420i auf dem Hauptturm.....	50
Abbildung 4.3: Ausgedünnte Punktwolke mit Standpunkten von Sommer 2008 und Herbst 2008.....	51
Abbildung 4.4: Laserscanner Riegl LMS-Z420i.....	54
Abbildung 4.5: Laserscanner Faro LS 880.....	54
Abbildung 5.1: Baum- und Plotparameter der plotweisen Inventuraufnahme in Seiten- und Draufsicht.....	55
Abbildung 5.2: Ableitung der Geländehöhe innerhalb einer 3D-Rasterzelle.....	57
Abbildung 5.3: a) Strukturelement mit Suchpositionen; b) Separierte Objekte eines Tragwerkschnittes.....	60
Abbildung 5.4: Grobsegmentierung in drei horizontalen Schichten.....	61
Abbildung 5.5: Schematischer Ablauf der Feinsegmentierung.....	61

Abbildung 5.6:	Schematische Darstellung der abgeschatteten Fläche A_{Schatten} durch einen Baumstamm.	62
Abbildung 5.7:	Sichtbare Mantelfläche des Stammes mit Laserscannerpunkten.....	63
Abbildung 5.8:	Fehldetektionen; Fehler 1. Art, Fehler 2. Art.....	64
Abbildung 5.9:	Venn-Diagramm zur Darstellung der Fehldetektionen.....	64
Abbildung 5.10:	Prinzip der Hough-Transformation für Kreise.....	65
Abbildung 5.11:	Binärbild einer horizontalen Punktwolken­schicht und mit eingeblendeten Houghkreisen.....	65
Abbildung 5.12:	Separierung der Baumpunkte mit vertikalen Zylindern.....	66
Abbildung 5.13:	Prinzip der Konnektivitätsanalyse im Entfernungsbild mit Grauwerten.....	67
Abbildung 5.14:	Ablauf der Baumdetektion am Ausschnitt einer Single-Scan-Aufnahme ohne Boden.....	68
Abbildung 5.15:	Voxelnachbarschaften.....	68
Abbildung 5.16:	Baumfußpunktbestimmung.....	70
Abbildung 5.17:	Interaktive Messung eines Stammdurchmessers mit dem Programm RiSCAN PRO.....	71
Abbildung 5.18:	Trigonometrische Durchmesserbestimmung mit Hilfe der äußeren Stammpunkte.....	71
Abbildung 5.19:	Ausgleichender Kreis im Vergleich zur ausgleichenden Ellipse einer Punktwolken­schicht.....	73
Abbildung 5.20:	Überprüfung der Krümmungsrichtung des ausgleichenden Kreises.....	74
Abbildung 5.21:	Definition des Zentriwinkels; 2D-Projektionen von Stammprofilen.....	75
Abbildung 5.22:	Stammdurchmesser mit einem Ausreißer.....	75
Abbildung 5.23:	Definition einer gedrehten Ellipse.....	76
Abbildung 5.24:	Definition eines beliebigen Zylinders.....	78
Abbildung 5.25:	Prinzip der Kreisbestimmung über Mittelsenkrechte.....	79
Abbildung 5.26:	Darstellungsmöglichkeiten der konvexen Hülle.....	80
Abbildung 5.27:	a) Stammprofil einer Buche mit eingepasstem Kreis; b) abgewickelte Profilpunkte.....	82
Abbildung 5.28:	Fehlerhafte Baumhöhenbestimmung bei dominierten Bäumen im Bestand.....	83
Abbildung 5.29:	Häufigkeitsverteilung der TLS-Punkte zweier Buchen in 10 cm Höheng­schichten.....	84
Abbildung 5.30:	Kronenschirmflächen eines Straßenbaumes abgeleitet aus einer Single-Scan-Aufnahme.....	85
Abbildung 5.31:	Konkave und konvexe Hülle der Kronenschirmfläche eines 7 m hohen Straßenbaumes.....	85
Abbildung 5.32:	Voxelraum zur Filterung der Punktwolke (Ablauf).....	87
Abbildung 5.33:	Eigenvektoren der Clusterpunkte; Stammabschnitt vor und nach der Punktselektierung.....	87
Abbildung 5.34:	Randpunktbestimmung im Strukturelement der XY-Projektion.....	88
Abbildung 5.35:	Manuell vektorisierter Buchenzweig mit detektierten Randpunkten und Schwerpunkten.....	89
Abbildung 5.36:	Prozesskette für den optimierten Holzzuschnitt.....	90
Abbildung 6.1:	Manuell markierte Kugel mit „Objekt-Markierung“ in Faro Scene.....	93
Abbildung 6.2:	Ablauf der Kugeldetektion.....	94
Abbildung 6.3:	Distanzmuster zweier Scanaufnahmen am Beispiel von vier Verknüpfungspunkten.....	95
Abbildung 6.4:	Programmoberfläche mit „Punktzuordnung mit Transformation“ und „Transformation“.....	98
Abbildung 6.5:	Prinzip der Bestimmung von virtuellen Verknüpfungspunkten.....	100

Abbildung 6.6:	Prinzip der Bestimmung von virtuellen Verknüpfungspunkten (horizontierter Laserscanner).....	100
Abbildung 6.7:	Stammsegmente zur ICP-Ausrichtung mit Schwerpunkten und der Scanrichtung.....	101
Abbildung 6.8:	Ablauf zur Registrierung von ALS- und TLS-Daten.	102
Abbildung 6.9:	Prinzip der Wasserscheidentransformation vor und nach der Glättung.....	103
Abbildung 7.1:	Detektionsfehler, aufgeteilt nach den vorhandenen Plotarten.....	107
Abbildung 7.2:	Segmentierungsergebnisse am Beispiel eines dicht bestockten Fichtenbestandes.....	107
Abbildung 7.3:	Überlagerte Delaunay-Triangulation der detektierten Bäume.....	109
Abbildung 7.4:	Entfernungsbilder mit Boden (a) und ohne Boden (b); Segmentierungsergebnis (c).....	110
Abbildung 7.5:	a) 2D-Entfernungsbild und b) 3D-Entfernungsbild eines lotrechten Scannerstandpunktes.....	110
Abbildung 7.6:	Voxelraumsegmentierung: a) Punktwolke mit sechs Fichten; b) und c) Voxelsegmente.....	111
Abbildung 7.7:	Abweichung der tachymetrisch und automatisch detektierten Baumfußpunkte.....	112
Abbildung 7.8:	Ausgleichende Ellipse eines Buchenstammprofils einer Multiple-Scan-Aufnahme.....	114
Abbildung 7.9:	a) 3D-Ansicht der Stammprofile eines Sitka-Fichten-Plots; b) 2D-Intensitätsbild des Plots.....	115
Abbildung 7.10:	Automatisch bestimmte Stammdurchmesser einer Sitka-Fichte mit den Harvesterdaten.....	116
Abbildung 7.11:	Ermittelte BHD von Stammsegmenten einer Single-Scan-Aufnahme.....	116
Abbildung 7.12:	Streudiagramme der Laserscannerbaumhöhen mit Vergleichshöhen.....	117
Abbildung 7.13:	Einzelansichten vom DGM und DKM, vom Boden und vom Turm.....	119
Abbildung 7.14:	Verdeckte horizontale Fläche in Abhängigkeit vom BHD und der Entfernung zum Scanner.....	119
Abbildung 7.15:	Nach der Entfernung farbcodierte Punktwolke in der Draufsicht (XY-Ebene).....	121
Abbildung 7.16:	Abbildung des Scanobjektes bei einer Objektbewegung entgegen der Scanrichtung.	121
Abbildung 7.17:	Abbildung des Scanobjektes bei einer Objektbewegung in Scanrichtung.	122
Abbildung 7.18:	Verzerrte Darstellungen eines Objektes bei Bewegung orthogonal zur Blickrichtung.....	122
Abbildung 7.19:	Plotkonfiguration von Scan 1 und Scan 2 mit eingezeichnetem Plotradius.....	123
Abbildung 7.20:	ICP-Registrierergebnis im Vergleich zur Registrierung über BHD und über sechs VP.....	125
Abbildung 7.21:	Kombinierte Darstellung der Registrierungen am Beispiel eines Stammquerschnittes.....	127
Abbildung 7.22:	Ergebnis der Wasserscheidentransformation des nDKM aus TLS-Daten.....	128
Abbildung 7.23:	Ergebnis der markerbasierten Wasserscheidentransformation des nDKM aus TLS-Daten.....	129
Abbildung 7.24:	nDKM der ALS-Daten mit den detektierten Baumpositionen.....	129
Abbildung 7.25:	20 cm breites Profil des nDKM.....	130
Abbildung 7.26:	Kombinierte Ansicht der registrierten TLS- und ALS-Punktwolken.....	131
Abbildung 7.27:	Automatisch detektierte Baumspitzen im TLS-Datensatz der Turmaufnahme.....	131
Abbildung 7.28:	Mögliche Datenkombinationen der TLS- und ALS-Aufnahme des Fichtenbestandes.....	133
Abbildung 7.29:	Einfluss des DGM auf die Baumfußpunktbestimmung.....	134
Abbildung 7.30:	Streudiagramm der ermittelten Baumhöhen.....	134
Abbildung 8.1:	Ermittelte Eigenvektoren von Punktclustern einer Fichte in 50 cm großen Voxeln.....	139
Abbildung 8.2:	Prinzip der Strahlverfolgung mit den klassifizierten Voxelzellen.....	140

Abbildung 8.3: Klassifizierte Voxelzellen.....	141
Abbildung 8.4: Voxelraumprofile des Fichtenbestandes mit einer Voxelgröße von 1 m.....	142
Abbildung 8.5: Gemittelttes Profil mit Ergebnissen der Large-Eddy-Simulation.....	143
Abbildung 8.6: Einteilung der Experimente und deren Messmethoden.....	144
Abbildung 8.7: Experimentaufbau Zugversuch.....	146
Abbildung 8.8: 2D-Intensitätsbild und 3D-Punktwolke des Versuchsbaumes im deformierten Zustand.....	146
Abbildung 8.9: Stammbestimmung im statischen Experiment.....	147
Abbildung 8.10: Trajektorienverlauf einer künstlich induzierten und windinduzierten Schwingung.....	148
Abbildung 8.11: Rindenstrukturen verschiedener Laub- und Nadelbäume.....	151
Abbildung 8.12: Prinzip Abwicklung.....	152
Abbildung 8.13: Ablauf zur Erstellung und Auswertung der Grauwertübergangsmatrix.....	153
Abbildung 8.14: Bilder der abgewickelten Punktwolken mit Darstellungen der Grauwertübergangsmatrizen.....	154
Abbildung 8.15: Ergebnisse der Kontrastberechnung mit vertikalen und horizontalen Verschiebevektoren.....	154
Abbildung 8.16: Eingangssignal, Amplitudenspektrum und Leistungsspektrum gemittelter Bildzeilen.....	155

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Tabellarische Gegenüberstellung der Single-Scan- und Multiple-Scan-Aufnahme.....	26
Tabelle 2:	Klassische Forstmessinstrumente.....	48
Tabelle 3:	Übersicht über die Studiengebiete.....	53
Tabelle 4:	Übersicht der Methoden der Durchmesserbestimmung.....	81
Tabelle 5:	Ergebnisse der Baumdetektion der Single-Scan-Aufnahmen der Studiengebiete im Wiener Wald.....	106
Tabelle 6:	Ergebnisse der Baumdetektion eines dichten Fichtenbestandes.....	108
Tabelle 7:	Detektionsergebnisse einer Punktwolkschicht (Clustermethode; 2D-Hough-Transformation).....	108
Tabelle 8:	Ungefilterte und gefilterte Ergebnisse der BHD- und Positionsbestimmung im Wiener Wald.....	113
Tabelle 9:	Ergebnisse des Buchenbestandes, getrennt nach Azimut, Strecke, BHDZ, BHDG und Ellipse.....	114
Tabelle 10:	Genauigkeitsmaße und Qualitätsmaß der Kreisausgleichung dreier Fichtenprofile.....	117
Tabelle 11:	Vergleich der Baumhöhenbestimmung der Single-Scan- und Multiple-Scan-Aufnahmen.....	118
Tabelle 12:	Detektionsergebnisse in Abhängigkeit von der Höhe und der Mindestpunktanzahl.....	120
Tabelle 13:	Ergebnisse der automatischen Kugeldetektion mit $n_{min} = 20$	124
Tabelle 14:	Parameter der automatisch detektierten Kugeln.....	125
Tabelle 15:	Registrierungsmethoden im Vergleich; Maßstab $m = 1$	126
Tabelle 16:	Vergleich der Grob- und Feinregistrierung anhand abgegriffener Punkte am Imkerhäuschen.....	130
Tabelle 17:	Gegenüberstellung der Transformationsparameter der Registrierung.....	132
Tabelle 18:	Zusammenstellung der kombinierten Datenauswertung, aufgelistet nach der Baumhöhe.....	135
Tabelle 19:	Klassifikation der Voxelzellen.....	140
Tabelle 20:	Gegenüberstellung der Messverfahren für statische und dynamische Zugversuche.....	149

Anhang

Anhang

A.1 Helmert-Transformation	A - 181
A.1.1 Koeffizientenmatrix A.....	A - 181
A.1.2 Beobachtungsvektor l.....	A - 182
A.2 Tabellarische Übersicht der Scannerspezifikationen	A - 183
A.3 Implementierung in Autostem Forest™	A - 184
A.3.1 Programmoberfläche Autostem Forest™.....	A - 184
A.3.2 Arbeitsablauf der automatischen Ableitung von Baumparametern.....	A - 185
A.4 Ableitung forstinventurrelevanter Parameter	A - 186
A.4.1 Buchenbestand – Clustermethode und 2D-Hough-Transformation.....	A - 186
A.4.2 Baumabstände im Fichtenbestand.....	A - 187
A.4.3 Segmentiertes Entfernungsbild.....	A - 187
A.4.4 Verdeckte Plotfläche	A - 188
A.5 Registrierung von TLS-Daten	A - 189

A.1 Helmert-Transformation

A.1.1 Koeffizientenmatrix A

Mit mehr als drei homologen Punktpaaren liegt eine Überbestimmung vor, die über Methoden der Ausgleichsrechnung eindeutig gelöst werden kann. Wie in Abschnitt 2.3.1.2 bereits beschrieben, sind in Abhängigkeit vom mathematischen Modell die Koeffizientenmatrix \mathbf{A} und der Beobachtungsvektor \mathbf{I} aufzustellen. Aus der Abbildungsvorschrift

$$\begin{bmatrix} X_{Soll} \\ Y_{Soll} \\ Z_{Soll} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_{Ist} \\ Y_{Ist} \\ Z_{Ist} \end{bmatrix} \quad (\text{A 1.1})$$

mit der Rotationsmatrix \mathbf{R}

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa & -\cos \phi \sin \kappa & \sin \phi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \phi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix} \quad (\text{A 1.2})$$

ergibt sich Matrix \mathbf{A} zu:

$$\mathbf{A}_{(3i,j)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{iSoll}}{\partial X_0} & \frac{\partial X_{iSoll}}{\partial Y_0} & \frac{\partial X_{iSoll}}{\partial Z_0} & \frac{\partial X_{iSoll}}{\partial \omega} & \frac{\partial X_{iSoll}}{\partial \phi} & \frac{\partial X_{iSoll}}{\partial \kappa} & \frac{\partial X_{iSoll}}{\partial m} \\ \frac{\partial Y_{iSoll}}{\partial X_0} & \frac{\partial Y_{iSoll}}{\partial Y_0} & \frac{\partial Y_{iSoll}}{\partial Z_0} & \frac{\partial Y_{iSoll}}{\partial \omega} & \frac{\partial Y_{iSoll}}{\partial \phi} & \frac{\partial Y_{iSoll}}{\partial \kappa} & \frac{\partial Y_{iSoll}}{\partial m} \\ \frac{\partial Z_{iSoll}}{\partial X_0} & \frac{\partial Z_{iSoll}}{\partial Y_0} & \frac{\partial Z_{iSoll}}{\partial Z_0} & \frac{\partial Z_{iSoll}}{\partial \omega} & \frac{\partial Z_{iSoll}}{\partial \phi} & \frac{\partial Z_{iSoll}}{\partial \kappa} & \frac{\partial Z_{iSoll}}{\partial m} \end{bmatrix} \quad (\text{A 1.3})$$

Für jeden Punkt werden drei Beobachtungsgleichungen aufgestellt. Somit ergibt sich die Anzahl der Zeilen zu $3i$ (i – Anzahl der Punkte). Die Differentialquotienten der Matrixelemente für die Translation in X_0 berechnen sich wie folgt:

$$\frac{\partial X_{iSoll}}{\partial X_0} = 1; \quad \frac{\partial Y_{iSoll}}{\partial X_0} = 0; \quad \frac{\partial Z_{iSoll}}{\partial X_0} = 0 \quad (\text{A 1.4})$$

Analog dazu ergeben sich die Differentialquotienten für Y_0 und Z_0 .

Die partiellen Ableitungen der Rotationsmatrix 1.2 nach den Winkeln ω , ϕ , κ sind in den nachfolgenden Rotationsmatrizen gegeben. Analog dazu ergeben sich mit dem Maßstab und dem Passpunkt des Ist-Systems die Differentialquotienten.

$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \omega} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\sin \omega \sin \kappa + \cos \omega \sin \phi \cos \kappa & -\sin \omega \cos \kappa - \cos \omega \sin \phi \sin \kappa & -\cos \omega \cos \phi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \phi \end{bmatrix} \quad (\text{A 1.5})$$

$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \phi} = \begin{bmatrix} -\sin \phi \cos \kappa & \sin \phi \sin \kappa & \cos \phi \\ \sin \omega \cos \phi \cos \kappa & -\sin \omega \cos \phi \sin \kappa & \sin \omega \sin \phi \\ -\cos \omega \cos \phi \cos \kappa & \cos \omega \cos \phi \sin \kappa & -\cos \omega \sin \phi \end{bmatrix} \quad (\text{A 1.6})$$

$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \kappa} = \begin{bmatrix} -\cos \phi \sin \kappa & -\cos \phi \sin \kappa & 0 \\ \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\cos \omega \sin \kappa - \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & 0 \\ \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \omega \sin \kappa + \cos \omega \sin \phi \cos \kappa & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A 1.7})$$

Die Differentialquotienten des Maßstabs ergeben sich zu:

$$\frac{\partial X_{iSoll}}{\partial m} = X_{Ist} r_{11} + Y_{Ist} r_{12} + Z_{Ist} r_{13} \quad (\text{A 1.8})$$

$$\frac{\partial Y_{iSoll}}{\partial m} = X_{Ist} r_{21} + Y_{Ist} r_{22} + Z_{Ist} r_{23} \quad (\text{A 1.9})$$

$$\frac{\partial Z_{iSoll}}{\partial m} = X_{Ist} r_{31} + Y_{Ist} r_{32} + Z_{Ist} r_{33} \quad (\text{A 1.10})$$

A.1.2 Beobachtungsvektor **I**

Der Beobachtungsvektor **I** bestimmt sich aus der Differenz der Koordinaten der Passpunkte und der Koordinaten der transformierten Passpunkten zu:

$$\mathbf{l}_{(i,1)} = \begin{bmatrix} X_{iSoll} - X_{iTrafo} \\ Y_{iSoll} - Y_{iTrafo} \\ Z_{iSoll} - Z_{iTrafo} \\ \vdots \\ X_{nSoll} - X_{nTrafo} \\ Y_{nSoll} - Y_{nTrafo} \\ Z_{nSoll} - Z_{nTrafo} \end{bmatrix} \quad \text{mit } i = 1, \dots, n \quad (\text{A 1.11})$$

A.2 Tabellarische Übersicht der Scannerspezifikationen

Tabelle A.1 gibt einen Überblick über die technischen Details der eingesetzten Laserscanner. Die Werte sind den Produktbroschüren der Laserscannerhersteller entnommen (Riegl, 2009; Faro, 2005).

Tabelle A.1: Spezifikationen der verwendeten Laserscanner (entnommen aus Riegl, 2009; Faro, 2005).

Spezifikationen	Riegl LMS-Z420i	Faro LS 880
Distanzmesser	Impulslaufzeit	Phasenvergleich
Reichweite	2 m – 1.000 m	0,6 m – 76 m
Distanzmessgenauigkeit	5 – 10 mm bei 50 m	3 mm bei 25 m
Aufnahmebereich	80 ° x 360 °	320 ° x 360 °
Datenrate	11.000 Hz	120.000 Hz
Wellenlänge	ca. 1.500 nm	785 nm
Laserklasse	1	3R
Strahldivergenz	0,25 mrad	0,25 mrad
Gewicht	16 kg	14,5 kg
Operationstemperatur	0 °C bis +40 °C	+5 °C bis +40 °C
Kamera	optional	optional
Steuersoftware	RiSCAN PRO	Faro Scene

A.3 Implementierung in *Autostem Forest*TM

A.3.1 Programmoberfläche *Autostem Forest*TM

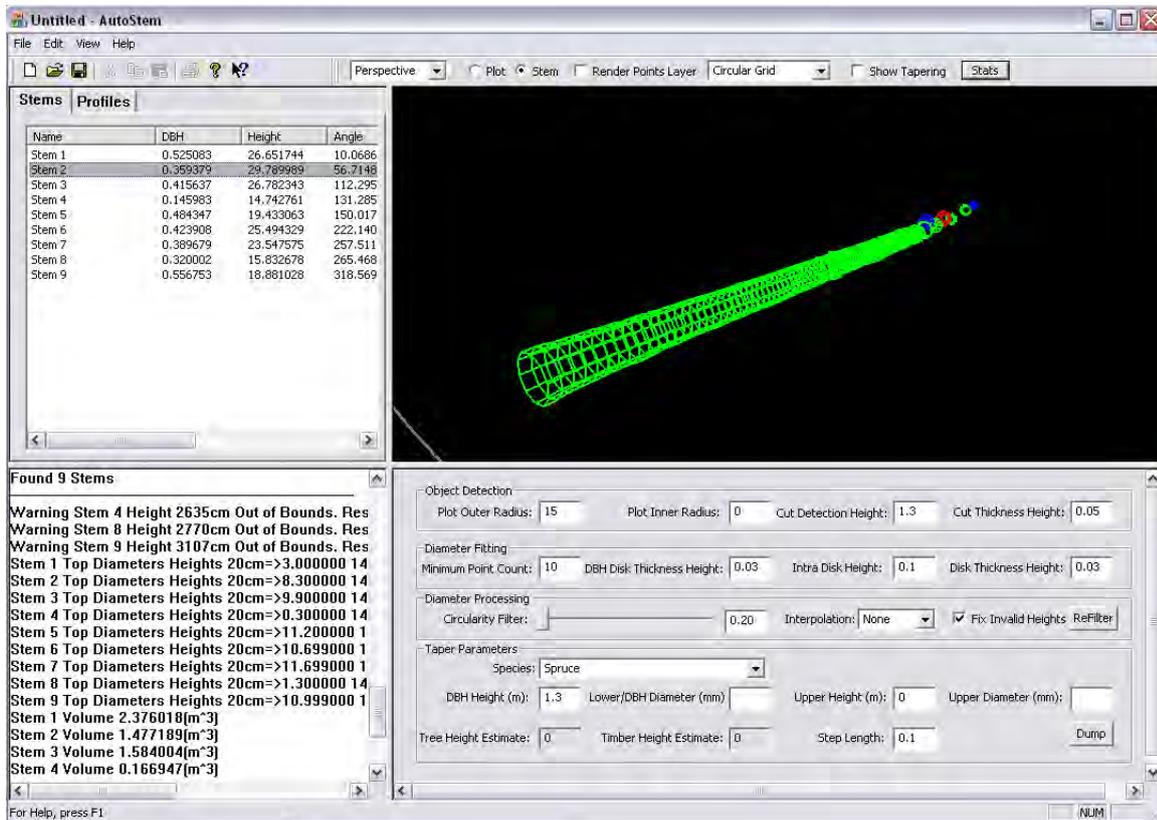
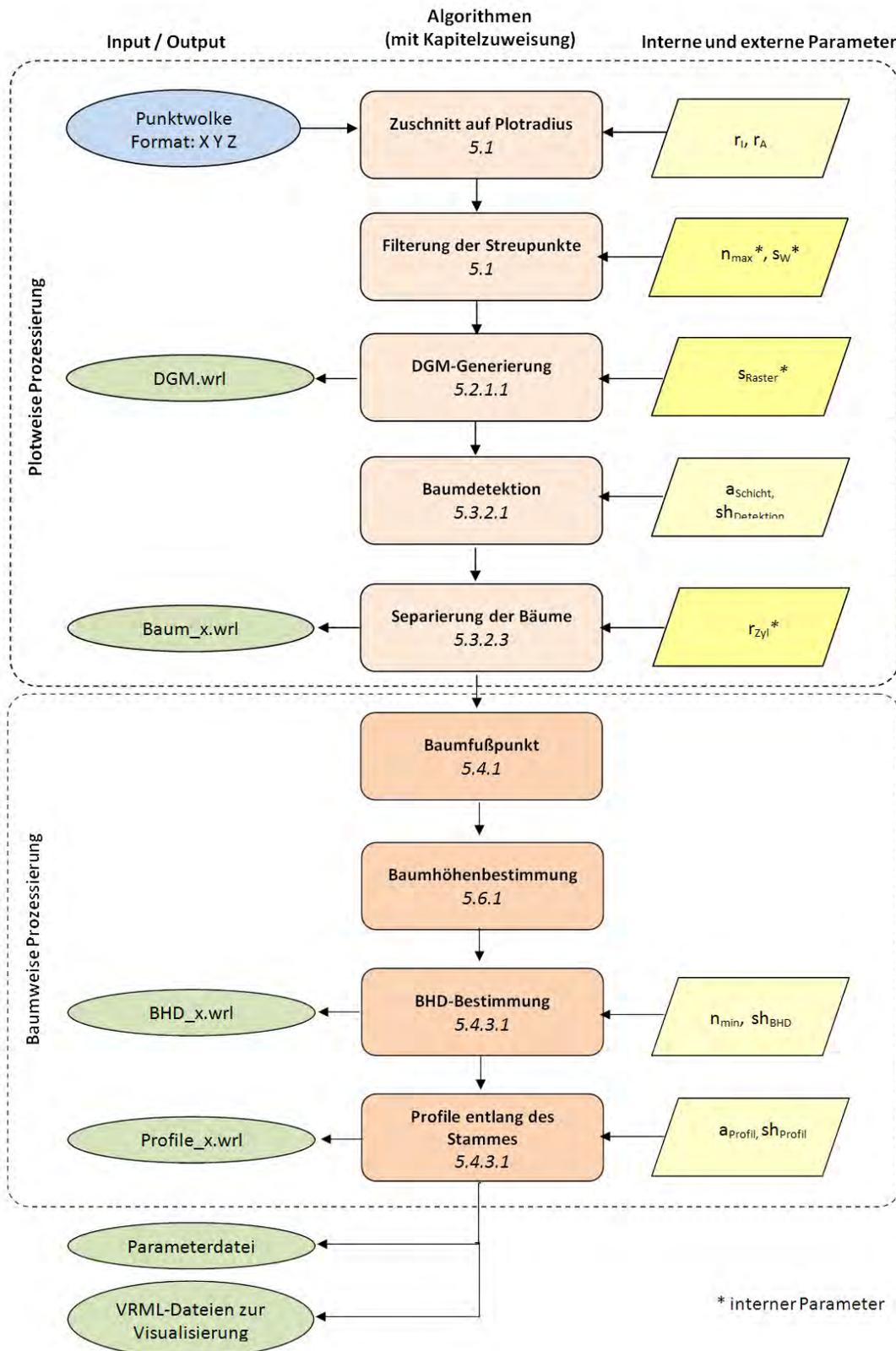


Abbildung A.3.1: Programmoberfläche von *Autostem Forest*TM mit ausgleichenden Stammdurchmessern. Grün sind die Durchmesser dargestellt mit einem Qualitätsmaß $P_d > 0,7$, die roten und blauen Durchmesser repräsentieren kleinere P_d -Werte.

A.3.2 Arbeitsablauf der automatischen Ableitung von Baumparametern



A.4 Ableitung forstinventurrelevanter Parameter

A.4.1 Buchenbestand – Clustermethode und 2D-Hough-Transformation

Tabelle A.2: Vergleich der Abweichungen von Radius und Baumposition (X,Y) zwischen Clustermethode und 2D-Hough-Transformation.

Abweichung [m]	Single-Scan-Aufnahme			Multiple-Scan-Aufnahme		
	Δr	ΔX	ΔY	Δr	ΔX	ΔY
Minimum	-0,045	-0,244	-0,165	-0,292	-0,203	-0,671
Maximum	0,144	0,276	0,175	0,185	0,225	0,180
Mittelwert	0,051	0,074	-0,015	0,041	0,083	-0,079

Die folgende Abbildung zeigt das Detektionsergebnis der 2D-Hough-Transformation anhand einer 5 cm hohen Punktwolken-schicht. Grün sind die korrekt detektierten Bäume dargestellt und rot die Bäume, die richtig detektiert wurden, allerdings außerhalb des Plotradius von 15 m liegen.

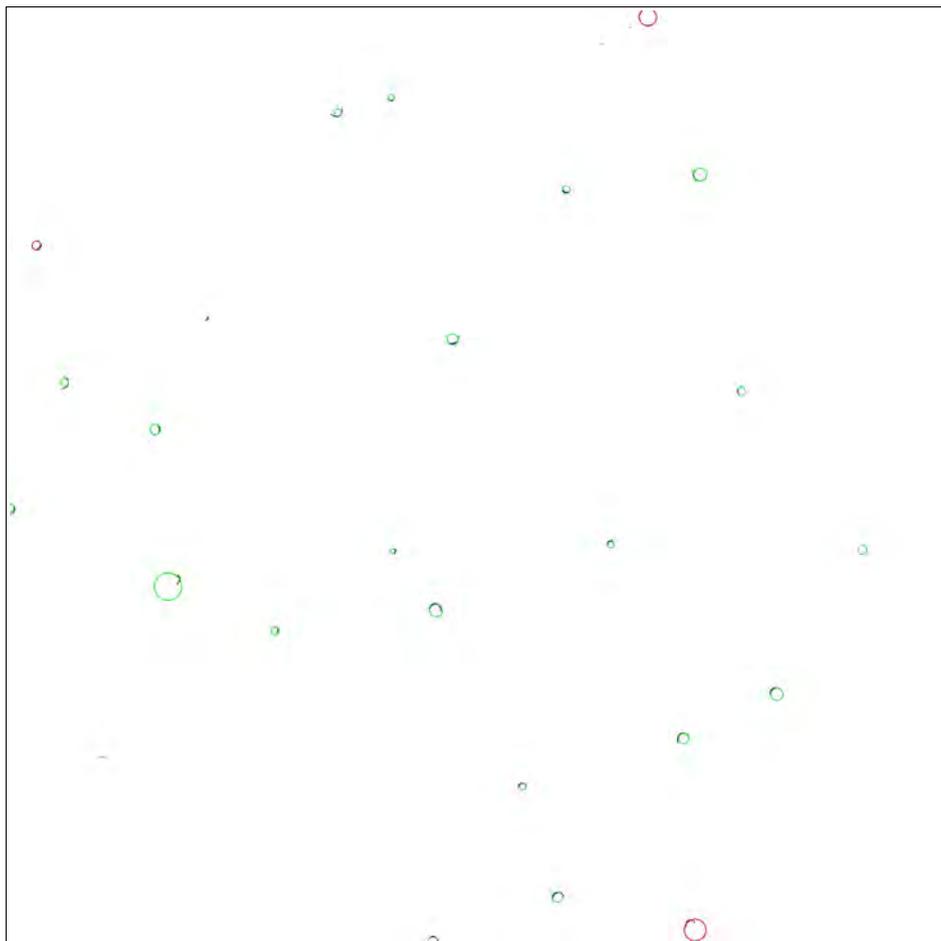


Abbildung A.4.1: Detektionsergebnis der Single-Scan-Aufnahme mit 19 detektierten Bäumen (grün) und 3 detektierten Bäumen außerhalb des Plotradius von 15 m (rot).

A.4.2 Baumabstände im Fichtenbestand

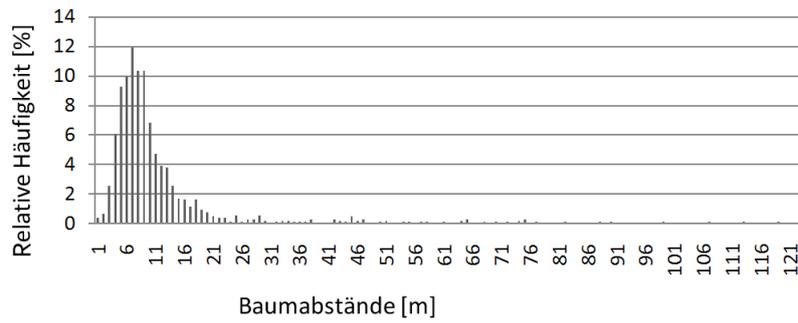


Abbildung A.4.2: Relative Häufigkeiten in % von 1.054 detektierten Baumabständen der Delaunay-Triangulation.

A.4.3 Segmentiertes Entfernungsbild

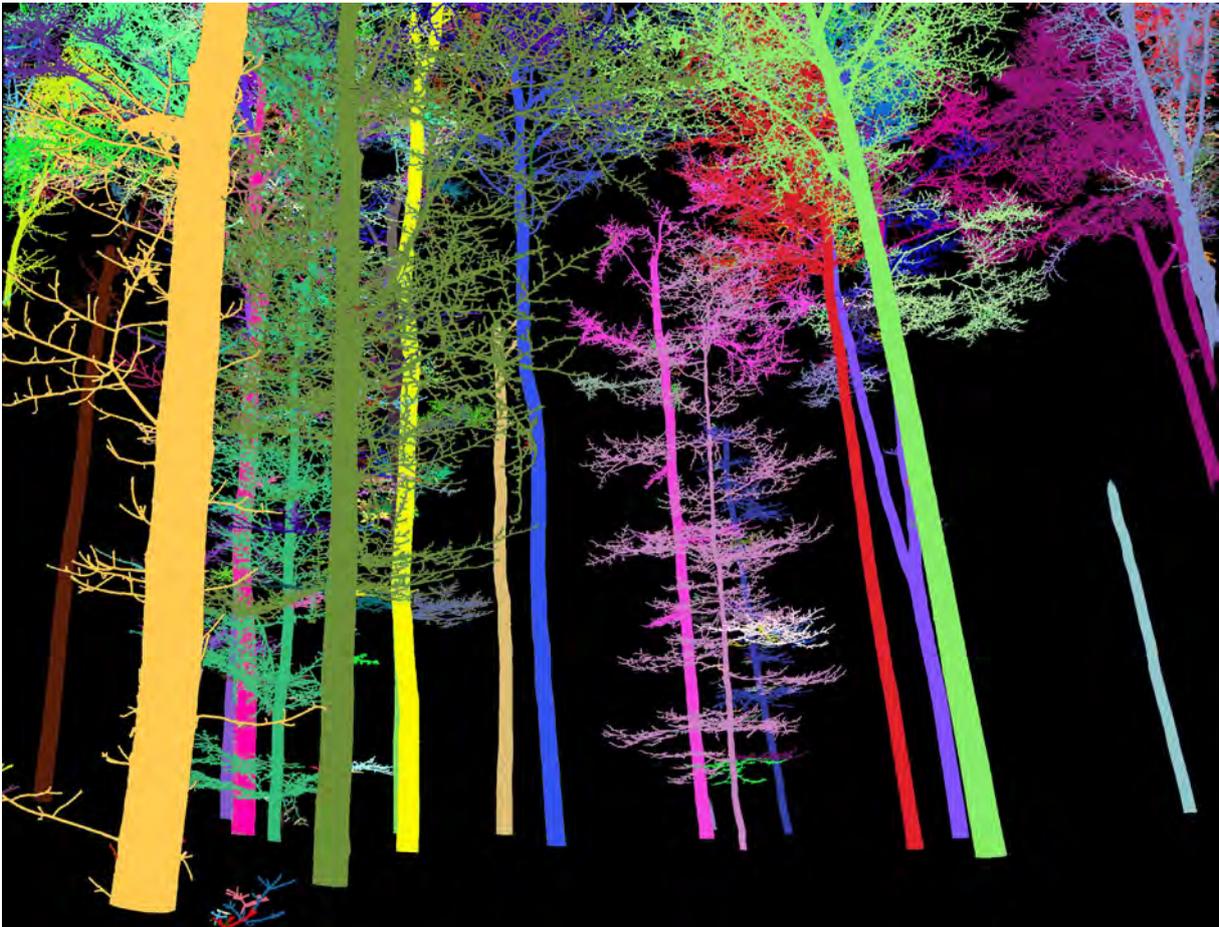


Abbildung A.4.3: Segmentierte Bäume auf Basis eines 2D-Entfernungsbildes mit einem Strukturelement von 33×33 Pixeln und einem Schwellwert von 8 cm zur Erfüllung des Ähnlichkeitsmaßes.

A.4.4 Verdeckte Plotfläche

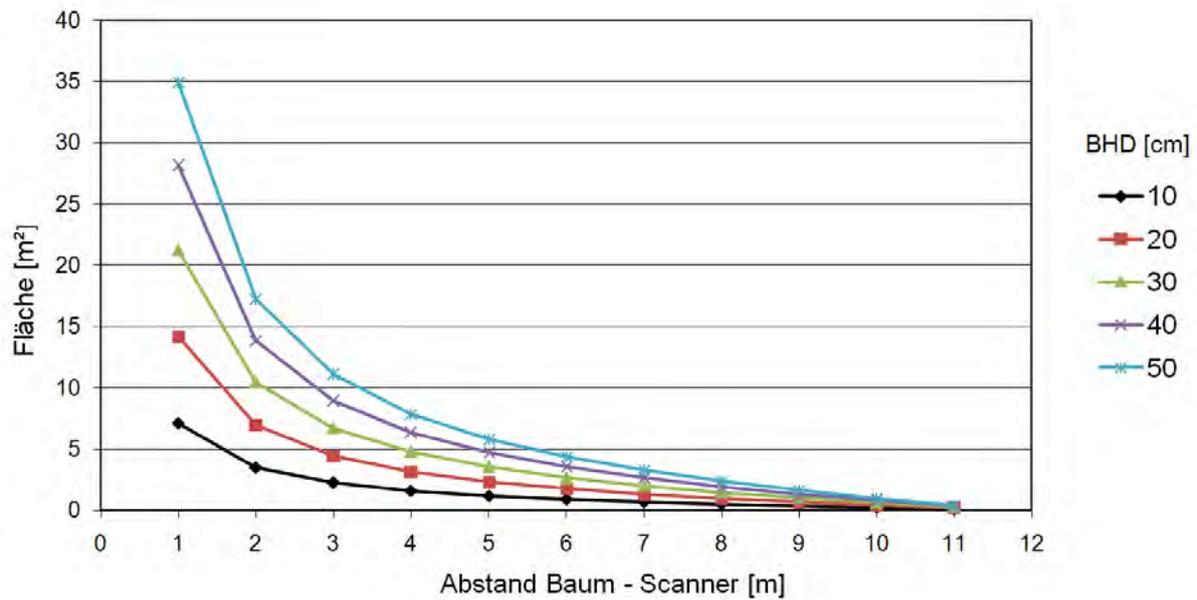


Abbildung A.4.4: Verdeckte horizontale Fläche der Bäume in Abhängigkeit vom BHD und von der Entfernung zum Scanner.

A.5 Registrierung von TLS-Daten

Gegenüberstellung der Registrierungsergebnisse der verschiedenen Methoden anhand eines Stammprofils einer Fichte. Das Profil wurde in einer Höhe von 14 m gewonnen und hat einen Abstand von 4,8 m vom 1. Standpunkt und von 7,2 m vom 2. Standpunkt.

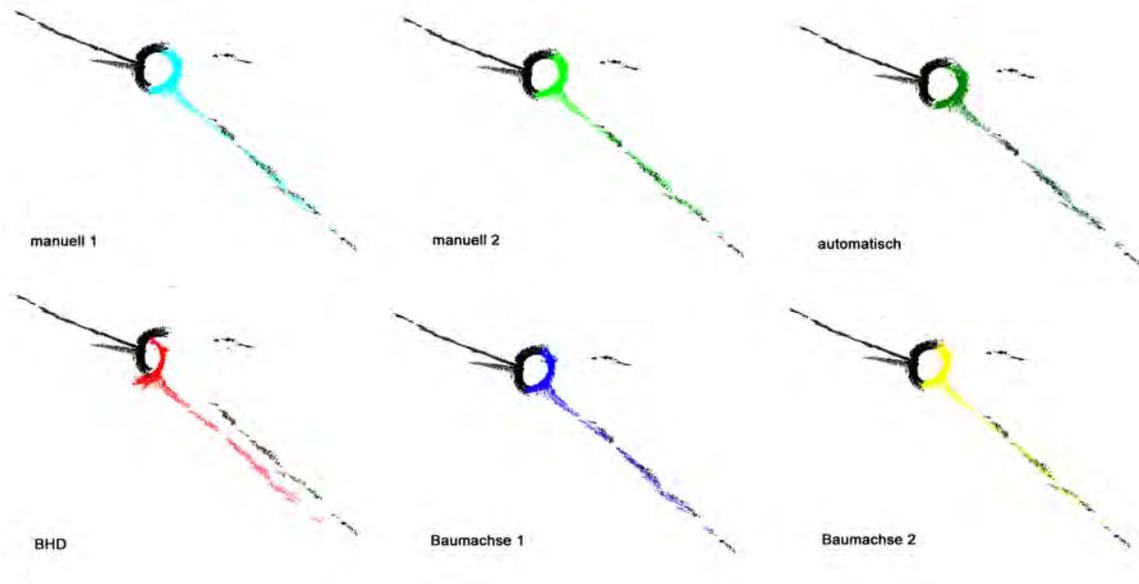


Abbildung A 5.1: Grafische Darstellung der Registrierungsergebnisse am Stammprofil einer Fichte, gewonnen in 14 m Höhe.

Danksagung

Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Fakultät Umweltwissenschaften an der Technischen Universität Dresden.

Als Erstes möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Hans-Gerd Maas danken, der mir die Möglichkeit einräumte, interessante Projekte am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung zu bearbeiten. Seine wissenschaftliche Betreuung während der Arbeit mit interessanten fachlichen Diskussionen sowie seine Anregungen zur inhaltlichen Gestaltung der Arbeit trugen maßgeblich zur Entstehung der Arbeit bei. Für seine Unterstützung, die es mir ermöglichte, meine Ziele zu erreichen, möchte ich ihm danken.

Ebenso möchte ich mich bei Prof. Dr. Norbert Haala bedanken für das Lesen meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die Unterstützung bei den zahlreichen Datenaufnahmen möchte ich meinen KollegInnen vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung und den Mitarbeitern des Instituts für Hydrologie und Meteorologie meinen Dank aussprechen. Für die Bereitstellung der Daten der Wiener-Wald-Studie danke ich der Firma TreeMetrics Ltd. aus Cork (Irland).

Ebenfalls gilt mein Dank meinen Projektpartnern des Projektes „*Turbulent exchange processes between forested areas and the atmosphere*“ des DFG-Schwerpunktprogramms 1276 „Metström“, insbesondere Prof. Dr. Christian Bernhofer, Dr. Ronald Queck, Dr. Jörg Stiller und Fabian Schlegel, für die interessanten Gespräche und für die Rücksichtnahme in den letzten Monaten vor der Abgabe.

Bei meinem Kollegen Dr. Danilo Schneider und meinen beiden ehemaligen Zimmerkolleginnen Ellen Schwalbe und Nadine Stelling möchte ich mich bedanken, da sie immer ein offenes Ohr für mich hatten und in den richtigen Momenten mit aufmunternden Worten die Arbeit vorangetrieben haben. Außerdem danke ich allen fleißigen Korrekturlesern, die so manchen Rechtschreib- und Kommafehler auf akribische Weise beseitigt haben.

Zum Abschluss möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, insbesondere bei meinen Eltern, die mir das notwendige Studium ermöglicht und dadurch das Interesse an der Forschung geweckt haben. Ein spezieller Dank gilt meinem Lebensgefährten Christoph für seine moralische Unterstützung, sein fortwährendes Verständnis und die Nachsicht für die eingelegten Wochenendarbeiten.