

# Master Thesis

im Rahmen des  
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“  
(UNIGIS MSc) am Zentrum für GeoInformatik (Z\_GIS)  
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

## „Ermittlung forstwirtschaftlicher Parameter aus mobilen terrestrischen Laserscanner-Daten“

vorgelegt von

**B. Eng. Michael Kürbs**  
U1499, UNIGIS MSc Jahrgang 2010

Zur Erlangung des Grades  
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:  
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

## Danksagung

Ich möchte mich bedanken bei meiner Freundin Carolin, für ihr Verständnis, ihre Motivation und die tatkräftige Unterstützung bei der Referenzmessung. Bedanken möchte ich mich außerdem bei Herrn Dr. Jörg Ruppe und den Mitarbeitern der Firma Rucon Engineering für die Integration der Versuche neben dem eigentlichen Tagesgeschäft und die Hilfestellung bei forstlichen Fragen. Ein großer Dank gebührt Jörn Selbeck und Volker Dworak vom Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim, die mit ihrer Datenaufnahme diese Arbeit erst möglich gemacht haben. Ich bedanke mich zudem bei Herrn Prof. rer. nat. Ronald Jurisch für seinen Beitrag zur Berechnung eines ausgleichenden Kreises und bei Steffen Tervooren von der Stadtverwaltung Potsdam für die Bereitstellung der luftgestützten Laserscanner-Daten.

## Erklärung

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Buchfart, 19.12.2012

# Abstract

This master thesis is about the use of mobile ground based LiDAR-technology (Light Detection and Ranging) in forest stands. There are different possibilities to detect information about trees from point clouds automatically. The main workflow of the analysis is based on four parts. These are: generating a height model, detecting tree positions, determination of diameters and finally getting the height of a tree. In case of the height model determination there are two methods of getting heights by a two-dimensional grid. After completing the calculation of the height model both methods need an error test. To detect the tree positions a vertical point density method is used. The published process is independent of the distance to the measurement vehicle. Because of more detections than existing trees an additional filtering is required. Before the stem can be analysed, the detection based point selection has to be proved. The check is based on the analysis of the measurement shadow, while a measurement vehicle is driving along the trees. If there is a point on the stem surface, there can't be any other point exactly behind that tree. For the stem analysis the reduced point selection is used for a layer based circle fitting in different heights. The resulting circles have to be proved under special conditions. In the workflow there are used a four meter high range over the ground and a radius of one meter for point selection. The stem can't be analysed completely, but for calculating the diameter at breast height a linear regression is used. In case of the tree height determination there is the possibility to compare ground based mobile LiDAR data with airborne LiDAR data. The comparison of the airborne data with mobile ground based data shows that in most cases the mobile ground based data produces enough points on the canopy of trees. But there are more errors in the single tree height determination. Summarising, primary forest inventory parameters can be determined for most trees near the sensor.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Laserscanning . . . . .	1
1.2	Mobiles Terrestrisches Laserscanning . . . . .	2
1.3	Zielstellung . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Forschungsstand</b>	<b>4</b>
2.1	Waldinventuren . . . . .	4
2.1.1	Bestandesaufnahme . . . . .	4
2.1.2	Primärmerkmale eines Bestandes . . . . .	4
2.1.3	Sekundäre Merkmale eines Bestandes . . . . .	6
2.2	Laserscanning in der Forstwirtschaft . . . . .	6
2.3	Geländeextraktion aus Laserscanner-Daten . . . . .	8
2.3.1	Minimalwert der Höhe . . . . .	8
2.3.2	Histogramme . . . . .	8
2.3.3	Fehlerpotential . . . . .	9
2.3.4	Ausreißerprüfung für Gelände-Punkte . . . . .	10
2.4	Baumdetektion aus Laserscanner-Daten . . . . .	10
2.4.1	Ausreißerprüfung . . . . .	10
2.4.2	Detektion durch Reflektanz . . . . .	10
2.4.3	Slicing . . . . .	11
2.4.4	Rasterfizierung . . . . .	11
2.4.5	Punktdichte . . . . .	11
2.5	Clusterung . . . . .	12
2.6	Standort und Durchmesser aus Laserscanner-Daten . . . . .	12
2.6.1	Kreis-Anpassung . . . . .	12
2.6.2	Sichel-Mond-Methode . . . . .	13
2.6.3	Zylinder-Anpassung . . . . .	14
2.7	Baumhöhenbestimmung aus Laserscanner-Daten . . . . .	15
2.8	Übersicht Forschungsstand . . . . .	16

<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>18</b>
3.1	Untersuchungsgebiet . . . . .	18
3.2	Datenaufnahme . . . . .	18
3.3	Datenhaltung . . . . .	19
3.4	Datensichtung . . . . .	20
3.5	Referenzmessung . . . . .	22
3.5.1	Bestimmung von Baumpositionen und Brusthöhendurchmes- sern . . . . .	22
3.5.2	Bestimmung der Baumhöhen . . . . .	24
3.6	Bestimmung der Geländeoberfläche . . . . .	25
3.6.1	Minimalwert der Höhe . . . . .	25
3.6.2	Histogramme . . . . .	26
3.6.3	Vergleich . . . . .	28
3.6.4	Ausreißerdetektion . . . . .	28
3.7	Baumdetektion . . . . .	29
3.7.1	Relative Punktdichte . . . . .	29
3.7.2	Gruppierung . . . . .	31
3.8	Stammanalyse . . . . .	33
3.8.1	Punktauswahl . . . . .	33
3.8.2	Verfahren zur Verbesserung der Punktauswahl . . . . .	35
3.8.3	Abschattung . . . . .	37
3.8.4	Kreisanpassung . . . . .	39
3.8.5	Analyse der Kreisanpassungen . . . . .	42
3.8.6	Bestimmung des Brusthöhendurchmessers . . . . .	49
3.9	Baumhöhenbestimmung . . . . .	52
3.9.1	Prüfung der Punktabdeckung im Kronenbereich . . . . .	52
3.9.2	Höhenbestimmung für erkannte Bäume . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Auswertung der Ergebnisse</b>	<b>55</b>
4.1	Ergebnis der Geländeermittlung . . . . .	55
4.2	Ergebnis der Baumdetektion . . . . .	55

4.3	Ergebnis der Stammanalyse . . . . .	56
4.3.1	Punktauswahl und Prüfung der Detektion . . . . .	57
4.3.2	Vollständigkeit der Baumerkennung . . . . .	57
4.3.3	Ergebnis der Kreisanpassung . . . . .	58
4.3.4	Ergebnis der Brusthöhendurchmesser-Bestimmung . . . . .	59
4.4	Ergebnis der Baumhöhenbestimmung . . . . .	61
4.4.1	Punktabdeckung . . . . .	61
4.4.2	Höhenbestimmung der Einzelbäume . . . . .	63
4.5	Vergleich des mobilen zum stationären terrestrischen Laserscanning	65
4.5.1	Vorteile . . . . .	65
4.5.2	Nachteile . . . . .	65
4.6	Vergleich des mobilen terrestrischen zum luftgestützten Laserscanning	65
4.6.1	Vorteile . . . . .	65
4.6.2	Nachteile . . . . .	65
4.7	Ausblick . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>68</b>
	<b>Literatur</b>	<b>70</b>
	<b>Anhang</b>	<b>74</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Beschreibung zur Aufnahme des Brusthöhendurchmessers aus [BEL, 2011] . . . . .	5
2	Messprinzip Baumhöhenmesser . . . . .	6
3	Hohe Punktdichte auf Geländehöhe . . . . .	9
4	a) Scan bei steigendem Gelände, b) Scan bei fallendem Gelände . .	9
5	Prinzip der Kreisanpassung aus Einzelpunkten und Zentriwinkel . .	13
6	Messfahrt entlang des Baumbestandes . . . . .	19
7	Übersichtsbild der Messfahrt . . . . .	19
8	Streudiagramm der X- und Y-Werte . . . . .	20
9	Streudiagramm der Y- und Z-Werte . . . . .	21
10	Streudiagramm der X- und Z-Werte . . . . .	21
11	Ausschnitt Punktwolke (coloriert nach Abstand vom Scanner (Y-Werte)) . . . . .	22
12	Tachymetrische Referenzmessung . . . . .	23
13	Referenzdatenbestand . . . . .	23
14	Referenz-Baumhöhen aus ALS-Daten auf Basis von Voronoi-Diagrammen (Einheiten in Meter) . . . . .	24
15	3D-Visualisierung für Minimalwert der Höhe bei einer Rasterweite von drei Metern . . . . .	25
16	Histogramme der Voxel mit 3 x 3m Grundfläche für verschiedene Abstände . . . . .	27
17	Slicing-Schicht und Raster-Vereinfachung . . . . .	30
18	3D-Visualisierung der Punktzahl je Rasterzelle (Grüne Pins sind Baumstandorte der Referenzmessung.) . . . . .	30
19	Lagerung der Slicing-Schichten zur Baumdetektion . . . . .	31
20	Gruppierte detektierte Bäume . . . . .	32
21	Punktauswahl für einen detektierten Baumstandort . . . . .	34
22	Prinzip Kreisanpassung mit einfacher und verbesserter Punktauswahl	34
23	Sichelförmige Punktverteilung . . . . .	36

24	Punktauswahl für detektierten Baum, a) Draufsicht, b) und c) Seitenansicht . . . . .	37
25	Prinzip Auswertung der Y-Werte in X/Z-Raster . . . . .	38
26	Darstellung einer Punktauswahl in X/Z-Ebene a) Streudiagramm b) Rasterdarstellung . . . . .	38
27	Kreisanpassungen für verschiedene Bäume im Höhen/Radius-Diagramm (Einheiten in Meter) . . . . .	42
28	Zentriwinkelverteilung für verschiedene Bäume . . . . .	45
29	angepasster Kreis bei BHD = 11 cm . . . . .	46
30	Beispiele für Radius-Differenzen und Wachstumsraten . . . . .	47
31	Baumdetektionen nach Filterung . . . . .	49
32	BHD-Berechnung durch ausgleichende Gerade (Einheiten in m) . .	50
33	Brusthöhendurchmesser für erkannte Bäume . . . . .	52
34	Baumhöhen der Referenzpositionen aus MLS-Daten (Einheiten in Meter) . . . . .	53
35	Baumhöhen für erkannte Bäume . . . . .	54
36	Generierte Geländeoberfläche . . . . .	55
37	Baumdetektionen nach Filterung . . . . .	58
38	Angepasster Kreis aus 890 Punkten a) Software Jag3D b) Methode von Jurisch [2009] . . . . .	59
39	Berechnete BHD für erkannte Bäume . . . . .	60
40	Abschattung hintereinander stehender Bäume . . . . .	61
41	Differenz der Baumhöhenbestimmung zwischen ALS-Daten zu MLS-Daten . . . . .	62
42	Differenzen der äquivalenten Baumhöhen . . . . .	63

# 1 Einleitung

Zur nachhaltigen und ertragsorientierten Bewirtschaftung von Forstflächen werden Inventuren von Baumbeständen durchgeführt. Detaillierte Informationen über Bäume und ihre Lebensbedingungen werden dabei erfasst. Bei solchen forstlichen Erfassungen kommen in der Regel anerkannte manuelle Methoden zum Einsatz. Mit den hier genutzten konventionellen Verfahren können Einzelbaum- und Bestandsinformationen nur sehr aufwendig bestimmt werden. Aus diesem Grund erfolgen forstliche Inventuren lediglich durch Stichproben, bei denen man die Messgrößen näherungsweise misst oder schlichtweg nur eine Schätzung durchführt. Es werden mehrere Stichproben verglichen und auf einen augenscheinlich homogenen Bestand hochgerechnet. Die Auswahl der Stichproben ist daher entscheidend für die Güte der Baumbestandserfassung. Zur Bestimmung der hierfür notwendigen Parameter kommen verschiedene Messverfahren zum Einsatz. Um deren Erfassung zu vereinfachen, wird im Rahmen dieser Arbeit angestrebt, diese Aufgabe möglichst automatisch auf Basis von dynamisch erfassten terrestrischen Laserscanning-Daten zu lösen. In dieser Arbeit wird nicht angestrebt Bäume vollständig dreidimensional zu rekonstruieren, sondern lediglich Kenngrößen von forstlichem Interesse zu ermitteln.

## 1.1 Laserscanning

Laserscanning ist eine Technologie, bei der ein Sensor Lichtimpulse an seine Umgebung aussendet. Diese Impulse werden dann von den umgebenden Objekten reflektiert. Durch die benötigte Zeit des Impulses wird die zurückgelegte Entfernung berechnet und gleichzeitig mit der Aussendungsrichtung des Impulses kombiniert. Die dabei entstehenden dreidimensionalen Polarkoordinaten werden letztendlich zu dreidimensionalen kartesischen Punktkoordinaten umgewandelt.

[Kamphaus, 2012] erörtert die geschichtliche Entwicklung von Laserscanning wie folgt:

Laserscanning entwickelte sich seit den 1950er Jahren und wurde vor den 1980er Jahren nicht im Kontext von Geodaten genutzt. Bis zu den frühen 2000er Jahren

beschränkte sich die Nutzung von Laserscanning auf spezielle Messaufgaben und Wissenschaften der Luft- und Raumfahrt. Die Langsamkeit dieser Entwicklung ist eng verbunden mit den technischen Möglichkeiten der Computertechnik. Erst durch die rasanten Entwicklungsfortschritte der Computertechnik im letzten Jahrzehnt, kam Laserscanning im Vermessungssektor sowie im Zusammenhang mit räumlichen Analysen zum Einsatz.

Mit der Weiterentwicklung der Laserscannersysteme erhöhte sich zum einen die Genauigkeit und die Messauflösung der Sensoren. Gleichzeitig stieg jedoch das Datenaufkommen an. Durch den Einsatz von 64-Bit-Hardware-Technik kann hier jedoch eine Verbesserung bei der Datenprozessierung erreicht werden [Kutzner, 2010].

### 1.2 Mobiles Terrestrisches Laserscanning

Das mobile terrestrische Laserscanning (MLS) gehört als spezielles Messverfahren zu den Mobile-Mapping-Anwendungen [Riedel, 2010]. Mobile - Mapping Technologien mit Laserscanning haben sich erst in den letzten Jahren als ein eigenständiges Feld in der Geoinformations-Branche etabliert. Dabei werden oftmals in Kombination mit photooptischen Verfahren, Umgebungsinformationen einer sich bewegendem Messeinrichtung erfasst. Durch das Zusammenspiel verschiedener Sensoren wird dabei eine permanente dynamische Positionierung des Messfahrzeuges ermöglicht. Mit solch einem System können für ein abgetastetes Gebiet flächendeckende dreidimensionale Daten in kurzer Zeit erfasst werden. Diese Systeme werden jedoch bislang vorrangig zur Erfassung von Verkehrswegen und Gebäuden genutzt [Riedel, 2010].

### 1.3 Zielstellung

Es wird angenommen, dass mit Daten mobiler terrestrischer Laserscanner forstwirtschaftlich relevante Größen einzelner Bäume ermittelt werden können. Ziel dieser Arbeit ist es daher, diese Hypothese zu prüfen und dafür notwendige Methoden zu beschreiben. Dabei sollen bereits veröffentlichte Methoden für stationäres Laserscanning auf Anwendbarkeit untersucht und gegebenenfalls spezialisiert werden. Die

Validierung der Auswertemethoden erfolgt an Hand eines Untersuchungsgebietes. Wichtige den Bestand beschreibende Baum-Parameter sind der Brusthöhendurchmesser und die Höhe eines Baumes (siehe Abschnitt 2.1.2). Aus diesen Informationen ist es möglich weitere in der Forstwirtschaft übliche Kenngrößen abzuleiten. Der Fokus dieser Arbeit liegt daher in der Bestimmung der zwei genannten Parameter für die Bäume des Untersuchungsgebietes.

## 2 Forschungsstand

### 2.1 Waldinventuren

Institutionen aus dem Forst- und Umweltbereich veranlassen zum einen großräumige Waldinventuren, um überblickend den Waldzustand und die Entwicklung zu beobachten [BEL, 2011]. Zum anderen werden kleinräumige Inventuren durchgeführt, welche auf Betriebs- bzw. Bestandesebene zur Unterstützung einer nachhaltigen forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung dienen. Auf Bestandesebene liefern beispielsweise Inventuren im Zuge der Forsteinrichtung wichtige Informationen über den aktuellen Zustand des Waldes, seiner Veränderung und dessen zukünftiger Entwicklung [Gadow, 2005].

#### 2.1.1 Bestandesaufnahme

Die Bäume eines Bestandes werden forstwirtschaftlich als Kollektiv betrachtet, da die Bäume einer gleichmäßig bewirtschafteten Waldfläche gleiche Eigenschaften besitzen [Kramer, 1982, S. 76]. Auf Grund dieser Tatsache erfolgt die Bestandesaufnahme in der Praxis an Hand von Stichprobenverfahren. Die dem gegenüberstehende aufwendigere Einzelbaumerfassung (Vollkluppung) wird daher nur im Versuchswesen und in Ausnahmefällen durchgeführt [Kramer, 1982, S. 77]. Forstliche Maßnahmen und Entscheidungen für einen Bestand geschehen auf Grundlage solcher Bestandesinventuren. Vor Ort werden Primärmerkmale eines Bestandes stichprobenhaft erfasst. Sekundärmerkmale können später daraus abgeleitet werden [Gadow, 2005].

#### 2.1.2 Primärmerkmale eines Bestandes

**Brusthöhendurchmesser** Der Brusthöhendurchmesser (BHD) ist der Durchmesser des Baumstammes in Brusthöhe. Er wird 1,3 m über dem Gelände gemessen [Kramer, 1982]. Die manuelle Messung erfolgt mit Kluppe oder Maßband. Obere Durchmesser können mit einer Teleskop-Kluppe oder verschiedenen optischen Instrumenten erfasst werden [Kramer, 1982]. Je nach Umgebungsbedingungen wird der BHD wie folgt definiert:

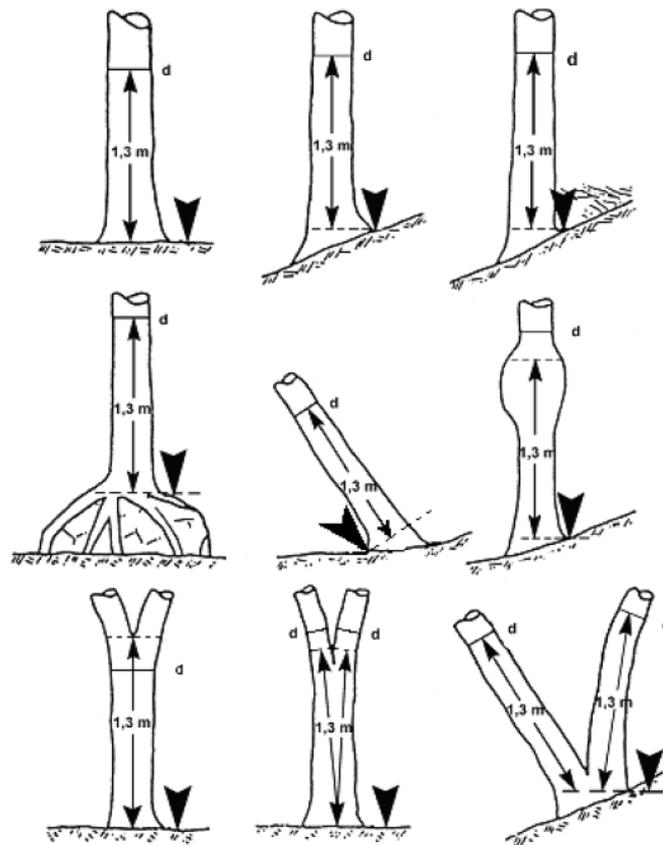


Abbildung 1: Beschreibung zur Aufnahme des Brusthöhendurchmessers aus [BEL, 2011]

**Baumhöhe** Die Baumhöhe ist eine essentielle Kenngröße bei der Beschreibung von Bäumen. Neben der Volumenbestimmung kann sie auch als Beweis für die Leistungsfähigkeit des Standorts stehen [Nagel, 2001]. Des Weiteren ist sie Voraussetzung bei der Nutzung zahlreicher Forsttabellen. Die Baumhöhe entspricht dem lotrechten Höhenunterschied zwischen dem Baumfußpunkt und der Kronenspitze [Nagel, 2001]. Während kleinere Bäume ( $< 6$  m) mit einer Messlatte gemessen werden können, behilft man sich bei größeren Bäumen trigonometrischer Funktionen [Kramer, 1982, S. 69]. In der Forstwirtschaft wird in der Regel mit Hilfe eines Baumhöhenmessers die Baumhöhe bestimmt (siehe Abbildung 2). Dabei handelt es sich um ein tragbares Instrument, bei dem man auf Basis des Höhenwinkels und dem konstanten Abstand des Betrachters zum Baum die Baumhöhe auf einer Ska-

la ablesen kann. Voraussetzung für diese Methode ist, dass der Betrachter immer im konstanten Abstand zum Baum steht und dass die Höhe der Augen über der Erdoberfläche jeweils zur Ablesung addiert werden muss.

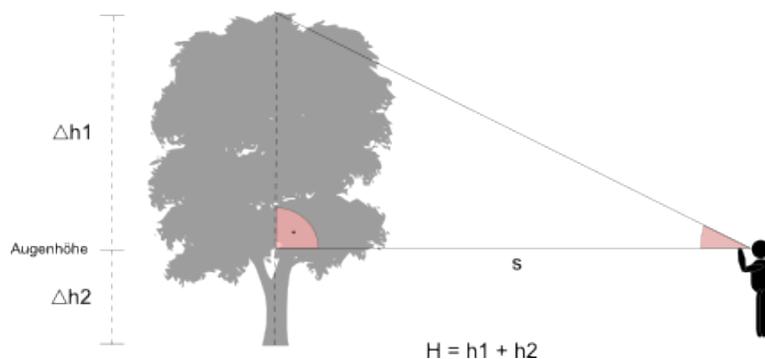


Abbildung 2: Messprinzip Baumhöhenmesser

Nach [Prodan, 1965] erreicht man bei gewissenhaftem Einsatz eines CHRISTEN - Baumhöhenmessers eine Genauigkeit von 5 - 6 % der jeweiligen Baumhöhe.

### 2.1.3 Sekundäre Merkmale eines Bestandes

Aus den Primärmerkmalen von Bäumen eines Bestandes können verschiedene sekundäre Größen abgeleitet werden. Solche Größen betreffen Informationen zu Vorrat, Konkurrenz und Biomasse. Der Mehrwert von erfassten Primärmerkmalen steckt daher in der anschließenden Ermittlung von speziellen bestandesbeschreibenden Faktoren.

## 2.2 Laserscanning in der Forstwirtschaft

Flugzeuggetragene Laserscanning-Messungen (ALS) finden bereits Anwendung in der Forstwirtschaft. Damit können flächendeckend Oberflächenstrukturen von Gelände und Baumkronen bestimmt werden. In diesem Zusammenhang können zusätzlich mit optischen Sensoren spektrale Eigenschaften der Baumkronen erfasst werden, um Aussagen über Zustand und Art von Bäumen treffen zu können. Beim Überflug werden Daten in senkrechter Richtung erfasst. Die Messstrahlen sind hier nahezu parallel zur Wuchsrichtung der Bäume, wodurch die Messpunkte kaum entlang eines Stammes, sondern im Wesentlichen auf dem Kronendach sowie an den

abgehenden Ästen zu erwarten sind. Während des Belaubungszustandes, dringen nur wenige Strahlen durch das Kronendach, um beispielsweise Teile der Baumstammes zu erfassen. Durch den großen Abstand zum Messobjekt ist die Messpunktauflösung flugzeuggestützter Aufnahmen gröber als bei terrestrischen Aufnahmen im Nahbereich. Auf Grund dessen sind mit diesem Verfahren von vornherein wenige Details erfassbar. Die Planung und Durchführung solcher Befliegungen ist aufwendig und kostenintensiv. Daher liegen Daten solcher Befliegungen bislang nicht flächendeckend vor.

Verschiedene Forschungseinrichtungen haben sich bereits mit der Auswertung von terrestrischen Laserscanning-Daten im Wald auseinandergesetzt. Wichtige Pionierarbeit leistete dabei das Projekt NATSCAN [Uni Freiburg, 2004], welches im Jahre 2001 vom Institut für Waldwachstum der Universität Freiburg gestartet und 2004 mit wichtigen Ergebnissen beendet wurde. Untersucht wird dabei sowohl die Verwendung von terrestrischen als auch luftgestützten Laserscannerdaten für Forst- und Landschaftsinventuren. Es werden dort Methoden entwickelt, um eine automatische Auswertung zu gewährleisten. Im Umfeld terrestrischer Messverfahren erfolgte jedoch bislang ausschließlich eine Betrachtung von Panoramaaufnahmen eines oder mehrerer fester Scanner-Standorte. [Thies, 2003] teilt die Einzelschritte der Baumbestimmung aus terrestrischen Laserscan-Daten wie folgt ein:

- Gelände
- Baumschäfte
- Kronen
- sonstige Objekte

Abweichend zu den Arbeiten, welche hochauflösende terrestrische Laserscanner verwenden, konstruierte [Ziegler, 2010] eine dynamische Sensoreinrichtung auf einer Holzerntemaschine. Neben den eigentlichen Hiebsdaten der Beerntung erfasst dabei ein 2D-Laserscanner geringerer Winkelauflösung in Kombination mit einer Kamera (Nahes Infrarot) Bestandesdaten während der Durchforstung. Durch eine Online-

Datenverarbeitung werden dabei in Echtzeit Inventurgrößen des verbleibenden Bestandes dokumentiert.

### 2.3 Geländeextraktion aus Laserscanner-Daten

Die Ermittlung des Geländes stellt bei der Auswertung einen grundlegenden Schritt dar. Der Anteil der Punkte, die zum Erdboden bzw. Erdbewuchs gehören, ist relativ hoch. Durch eine Zuordnung der Geländepunkte kann daher eine erste Filterung der Daten erfolgen. Die Kenntnis der Geländeform ist zudem eine wichtige Planungsgrundlage für forstliche Maßnahmen. In Abhängigkeit von Neigung und Geländeform variieren die technischen Möglichkeiten für solche Handlungen. Des Weiteren bildet das Geländemodell die Grundlage aller nachfolgenden Analysen. Es sollte daher zum einen zuverlässig sein und zum anderen mit einer möglichst hohen Abdeckung für das gescannte Gebiet bestimmt werden. Im Rahmen bisheriger Arbeiten werden bereits zwei robuste Verfahren zur Geländebestimmung vorgestellt, welche nachfolgend untersucht werden. Beide überspannen das Messgebiet mit einem gleichmäßigen Raster. Als Rasterweite nutzen [Aschoff, 2004b] und [Simonse, 2003] 50 cm. Für jede Rasterzelle wird mit der jeweiligen Methode eine Geländehöhe bestimmt.

#### 2.3.1 Minimalwert der Höhe

[Simonse, 2003] sowie [Thies, 2004] berechnen für jede Rasterzelle den niedrigsten Z-Wert der darin enthaltenen Messpunkte. Beispielsweise durch Mehrwegeeffekte von Messstrahlen kann es zu Fehlmessungen kommen. Solche Fehlpunkte können sich auch unterhalb der Erdoberfläche befinden und damit die Geländeermittlung direkt beeinflussen. Aus diesem Grund müssen diese Pseudo-Punkte als Ausreißer detektiert und aus der Punktwolke entfernt werden.

#### 2.3.2 Histogramme

Für die Ermittlung der Geländeoberfläche verwendet [Bienert, 2007] ein Verfahren, welches innerhalb jeder Rasterzelle die Punktverteilung entlang der Z-Achse analysiert. So stellt sie fest, dass eine Anhäufung von Punkten auf Höhe des Geländes

besteht. Daraufhin definiert sie das Gelände am globalen Maximum für jede Rasterzelle. Diese Methode ist robust gegen Pseudo-Punkte unterhalb der Erdoberfläche, da diese einzeln vorkommen und sich nicht in bestimmten Bereichen sammeln.

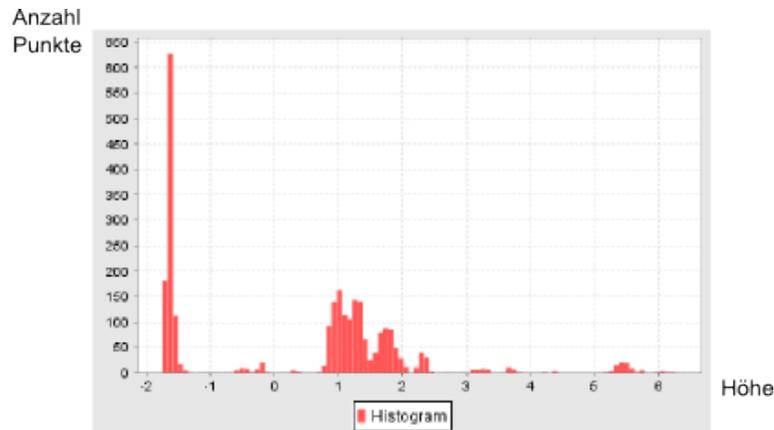


Abbildung 3: Hohe Punktdichte auf Geländehöhe

### 2.3.3 Fehlerpotential

Neben den bereits oben genannten Pseudo-Punkten weist [Aschoff, 2004a] darauf hin, dass durch Abdeckung von Büschen oder Baumschatten Bereiche entstehen, in denen kein Punkt auf dem Erdboden vorkommt. Hinzukommend wirkt sich der Verlauf des sich rechtwinklig zur Fahrachse anschließenden Geländes auf die Punktabdeckung aus. So wird ein vom Sensor aus steigendes Gefälle besser abgedeckt, während es bei abfallendem Gelände zu Abschattungen hinter Geländesprüngen kommt. Für die Sensorbefestigung ist nach diesem Gesichtspunkt eine hohe Anbringung vorteilhaft.

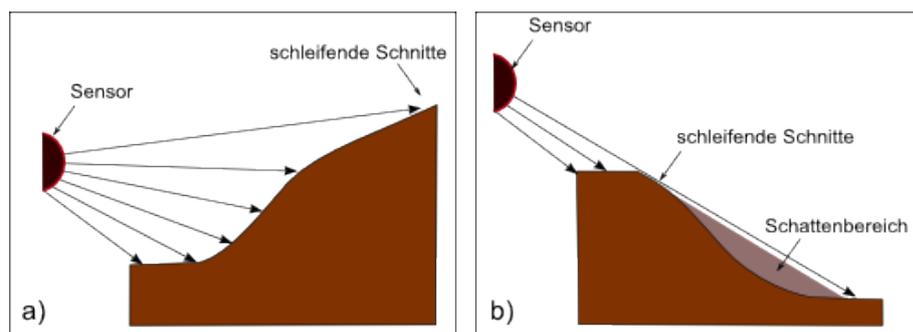


Abbildung 4: a) Scan bei steigendem Gelände, b) Scan bei fallendem Gelände

### 2.3.4 Ausreißerprüfung für Gelände-Punkte

[Simonse, 2003] und [Bienert, 2007] vergleichen die generierten Rasterzellen mit ihren Nachbarzellen. Weichen diese wesentlich voneinander ab, wird der Wert des Rasters verworfen. Zusätzlich prüft [Simonse, 2003] sein Gelände auf Neigungs-sprünge und sucht in diesem Zusammenhang nach Stellen mit steilem Gefälle.

## 2.4 Baumdetektion aus Laserscanner-Daten

Die Baumdetektion stellt die Grundlage für nachfolgende detaillierte Fragestellungen. Hierbei erfolgt die Lokalisierung der einzelnen Bäume im Messgebiet. Grundlage für diesen Arbeitsgang ist die um das Gelände reduzierte Punktwolke. Während [Hopkinson, 2003] die Bäume noch manuell in der Punktwolke detektiert, werden in verschiedenen Arbeiten bereits mehrere Verfahren zur automatischen Detektion vorgestellt. Detektierte Baumpositionen sind Cluster. Zu diesen erfolgt eine Zuordnung der zugehörigen Messpunkte.

### 2.4.1 Ausreißerprüfung

Einzelne Punkte die keinen direkten Nachbar vorweisen, sind isolierte Punkte. Unter dieser Annahme markieren [Thies, 2003] und [Simonse, 2003] Punkte die innerhalb eines bestimmten Abstandes keinen Nachbarn haben als Ausreißer. Zusätzlich legte [Simonse, 2003] fest, dass mindestens vier Nachbarpunkte vorliegen müssen.

### 2.4.2 Detektion durch Reflektanz

Zu jedem Messpunkt erfasst der Laserscanner einen Reflektanzwert, welcher die Intensität des reflektierten Signals widerspiegelt. Je nach Beschaffenheit der Oberfläche werden unterschiedliche Intensitätswerte erfasst. Daher reflektieren beispielsweise Blätter den Laserstrahl anders als die Rinde eines Baumes. Zusätzlich variiert die Stärke des reflektierten Signals in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, den äußeren Messbedingungen und der Entfernung zum Messobjekt. In keiner der hier aufgeführten verwandten Arbeiten ist die Information der Reflektanz in die Analyse mit eingeflossen und wird deshalb in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

### 2.4.3 Slicing

Beim Slicing erfolgt eine Punktauswahl für einen schichtförmigen Korridor, welcher in einem konstanten Abstand als parallele Schicht über dem Gelände verläuft. Im zweiten Schritt werden für diese Punktauswahl die Z-Werte vernachlässigt und die Geometrien somit in die Ebene projiziert. Dieses Verfahren stellt bei der Baumdetektion einen Vorverarbeitungsschritt dar, um dreidimensionale Daten zu vereinfachen.

### 2.4.4 Rasterfizierung

[Aschoff, 2004b] und [Simonse, 2003] nutzen zur Baumdetektion Algorithmen aus der digitalen Bildverarbeitung. Durch das Slicing entstandene horizontale Schichten der Punktwolke werden dabei rasterfiziert und der Grauwert jedes Pixels proportional zur Anzahl der beinhalteten Punkte gesetzt. [Aschoff, 2004b] definiert quadratische Raster mit der Rasterweite von 0,01 m. Dabei erhält man 100 Millionen Pixel für ein Gebiet von einem Hektar. An Hand des entstandenen Rasters werden mit Hilfe der Hough-Transformation kreisähnliche Gebilde detektiert, die in einem zweiten Schritt mittels Formanpassung genauer beschrieben werden. Da je nach Anordnung und Anzahl der Scannerstandpunkte entlang eines Baumstammes Schattenbereiche nicht ausgeschlossen werden können, sind in der Regel unvollständige Kreise zu erwarten. [Aschoff, 2004b] detektierte mit der Bildverarbeitungs-Methode für seine "Multiple-Scan-Modus"-Punktwolke nur 40 % der Bäume, wobei dickere Bäume besser erkannt werden als dünnere.

### 2.4.5 Punktdichte

[Bienert, 2007] erzeugt drei 10 cm hohe Slicing-Schichten, die jeweils in zwei Schritten analysiert werden. Zuerst erfolgt eine Vorsegmentierung mit einem 2D-Clusteralgorithmus. Wobei die entstehenden Raster eine gewisse Mindestanzahl an Punkten erfüllen müssen. Im zweiten Schritt wird für jede Schicht raster- beziehungsweise voxelbasiert eine verfeinerte Auswahl getroffen.

In einem zweidimensionalen Raster mit einer Weite von 0,5 m wird für jede der drei Schichten die Anzahl der Messpunkte gezählt. Unter Verwendung eines definierten Grenzwerts werden alle Zellen mit Werten oberhalb dieser Grenze weiter betrachtet.

### 2.5 Clusterung

[Klemmt, 2008] verwendet ähnlich zu [Bienert, 2007] eine auf Raster basierende Detektion. Anschließend gruppiert er seine auf mehreren Höhenschichten aufbauende Detektion mit dem dichtebezogenen Clusteralgorithmus DBSCAN [Ester, 1996]. Dieser erstellt Cluster an Hand eines maximalen Punktabstandes und einer minimalen Punktzahl. [Klemmt, 2008] erreichen für ihre Versuche Detektionsquoten zwischen 97,4 % und 106,4 %.

### 2.6 Standort und Durchmesser aus Laserscanner-Daten

An Hand der detektierten Punkte wird nun eine Punktauswahl generiert. Mit einem Buffer um den Detektionspunkt wird der Auswahlbereich definiert. [Bienert, 2007] verwendete einen 1,5 m breiten Buffer-Radius zur Selektion.

#### 2.6.1 Kreis-Anpassung

Ein Kreis wird beschrieben durch mindestens drei auf der Kreisbahn liegende Punkte. Erhöht sich die Anzahl der Punkte, so hat man mehr Messwerte als für die Berechnung notwendig wären. Durch die Genauigkeit von Messinstrumenten und die Auswahl der Messwerte liegen die Punkte nicht exakt auf einer Kreisbahn. Sie streuen stattdessen entlang der Kreisbahn. Nimmt man nur drei Punkte aus der gesamten Messreihe, haben mögliche Fehlwerte direkten Einfluss auf den berechneten Kreis [Drixler, 1993]. Aufgabe einer Kreis-Anpassung ist es, aus einer Vielzahl von Messwerten einen best-angepassten Kreis zu bestimmen, so dass sich die Messfehler ausgeglichen auf die Messwerte verteilen. Das gebräuchliche Verfahren solcher Ausgleichs-Aufgaben ist die Methode der kleinsten Quadrate [Drixler, 1993]. [Kramer, 1982, S. 49] weist darauf hin, dass der Querschnitt von Baumstämmen von einer Kreisform abweicht und daher oft ellipsen- oder eiförmig ist. [Aschoff, 2004b]

vergleicht die Anpassung von Baumstämmen an Kreis und Ellipse. Dabei stellt er fest, dass Kreise einen Baumstamm ausreichend genau approximieren. Die Kreis-anpassung ist ein nicht-lineares Problem. [Simonse, 2003, Thies, 2003, Bienert, 2007, Pál, 2007, Schilling, 2011] nutzen für die Durchmesserbestimmung ebenfalls eine Kreis-anpassung. [Bienert, 2007] führt zudem einen Zuverlässigkeits-Faktor ein, der die Durchmesserermittlung von Bäumen bewertet. Dieser setzt sich zusammen aus dem zu Grunde liegenden Zentriwinkel, der zu erwartenden Punktabdeckung für einen Stammabschnitt, der Genauigkeit des berechneten Durchmessers und dem Median aller Durchmesser des Stammes. Mit ihrer Methode erkennt sie 212 von 224 Bäumen.

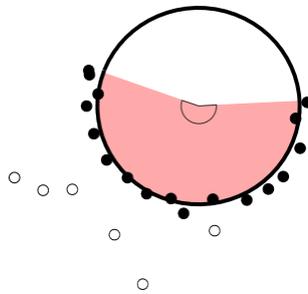


Abbildung 5: Prinzip der Kreis-anpassung aus Einzelpunkten und Zentriwinkel

### 2.6.2 Sichel-Mond-Methode

[Király, 2007b] verwendet eine Methode, welche die vom stationären Scanner ausgehende perspektivische Sicht auf einen Baum nutzt, um die Breite von Bäumen zu ermitteln. Zunächst wird eine detektierte Punktauswahl von Ausreißern befreit. Vom Scanner aus werden für jeden Messpunkt die Richtungen bestimmt. Anschließend berechnet er einen Kreis aus drei Punkten (Minimum, Maximum und Mittelwert der Richtungen). Dieses Verfahren zur Kreisberechnung ist speziell für die stationäre Messmethode definiert. Statt der perspektivischen Sicht liegt in dieser Arbeit eher eine orthogonale Erfassung vor. Um dieses Verfahren für mobile Anwendungen nutzbar zu machen, ist daher eine Modifikation notwendig. Mit der Hinzunahme von virtuellen Standorten, welche sich in einem regelmäßigen Intervall auf der Fahrachse befinden, könnten die stationären Scannerstandorte simuliert werden. Durch die perspektivisch geprägte Auswertung würden jedoch entfernte Bereiche mehrfach durchlaufen. In gering erfassten Bereichen könnte man jedoch dadurch

bessere Ergebnisse erzielen. Der Ansatz der Sichel-Mond-Methode kommt bei dem Testdatensatz nicht zur Anwendung, da neben der perspektivischen Betrachtung durch die niedrige Winkel-Genauigkeit der Scandaten und der damit verbundenen Punktstreuung höhere Durchmesserwerte zu erwarten sind.

### 2.6.3 Zylinder-Anpassung

Zur Beschreibung der Stammform verwenden [Pfeifer, 2004], [Lalonde, 2006] und [Hopkinson, 2003] eine dreidimensionale Zylinder-Anpassung. [Pfeifer, 2004] nutzt dabei die Methode von [Lucacs, 1998]. Mit der Zylinder-Anpassung verallgemeinert man die Kreisanpassung in den dreidimensionalen Fall. Man ersetzt den Mittelpunkt des Kreises durch eine Achse im Raum. Die Abstände von der Achse zu den Punkten auf der Zylinderoberfläche sollten gleich sein. Ein Baumschaft ist jedoch nicht zylindrisch, sondern verjüngt sich nach oben hin. Zusätzlich sorgen Krümmungen oder Verwachsungen für Abweichung zum Zylinder. Um die Effekte der sich im Allgemeinen nach oben verjüngenden Stammform oder der Stammkrümmung zu verringern, berechnet [Pfeifer, 2004] seine Zylinder lediglich für Stammabschnitte von 50 cm Länge. Dünnere Stämme sind oft stärker gekrümmt, so dass er in diesem Fall sogar kürzere Zylinderlängen empfiehlt. Die mittlere Genauigkeit seiner Zylinderanpassung lag bei 0,03 m.

**Zylinderverfolgung** Eine Zylinderverfolgung ist die entlang des Baumschaftes durchgeführte Betrachtung aufeinanderfolgender angepasster Zylinder. [Pfeifer, 2004] selektiert die Punktauswahl für den nächsten Zylinder an Hand eines Zylinders, welcher um einen bestimmten Betrag verlängert wird. Punkte, die sich nahe am verlängerten Zylinder befinden, werden für den nächsten Zylinder verwendet. Er verlängert standardmäßig um 30 % der Zylinderlänge. Ist das Ergebnis zu schlecht, verlängert er nur um 16 %. Er erlaubt dabei eine maximale Radiusänderung in Höhe von 2,5 %.

## 2.7 Baumhöhenbestimmung aus Laserscanner-Daten

[Chasmer, 2004] vergleicht die Punktabdeckung zwischen terrestrischen und flugzeuggetragenen Laserscanning im Nadel- als auch im Mischwald. Sie stellt dabei fest, dass bei flugzeuggetragenen Laserscanning nur wenige Punkte durch das Kronendach auf Stamm und Astwerk treffen. Dem gegenüber werden obere Baumabschnitte durch die terrestrische Methode schlecht erfasst. In [Aschoff, 2004b] wird aufgezeigt, dass eine direkte Baumhöhenbestimmung an Hand terrestrischer Laserscanner-Daten nur in geringem Maße möglich ist, da die Messstrahlen oft nicht in obere Schaftbereiche oder gar bis zum Kronendach vordringen. Stattdessen wird dort versucht auf Basis statistischer Erhebungen die Baumhöhen zu schätzen (siehe indirekte Höhenbestimmung). Dennoch wird in [Bienert, 2008] lediglich mit dem örtlichen maximalen Z-Wert gearbeitet. Jedoch wird gezeigt, dass unter Nutzung mehrerer Scannerstandpunkte eine höhere Punktdichte im Kronenbereich erzielt werden kann, welche eine Verbesserung der Höhenbestimmung bewirkt. Zusätzlich macht sie darauf aufmerksam, dass durch Vermischungseffekte mit Nachbarbäumen große Abweichungen zu Stande kommen können.

**Indirekte Höhenbestimmung** Eine direkte Höhenbestimmung aus Laserscanner-Daten erfolgt über den höchsten Messpunkt an dem entsprechenden Baum. Dem gegenüber erfolgt die indirekte Höhenbestimmung durch Informationen der Stammform. Stammform und Baumhöhen haben einen direkten Zusammenhang. Jedoch ist die Ausprägung der Korrelation abhängig von der Baumart. [Gadow, 2003] Die damit verbundene Extrapolation von Daten ist lediglich eine Schätzung und kann aus diesem Grund nur näherungsweise den wahren Wert einer Sache beschreiben. Vorteil der indirekten Höhenbestimmung ist jedoch, dass Vermischungseffekte im Kronenbereich keinen Einfluss haben, da die Baumhöhe auf Grundlage der tatsächlich gemessenen Stammform berechnet wird. [Aschoff, 2004b] extrapoliert die Baumschäfte mittels Schaftformfunktion. Da Schaftformfunktionen baumartenspezifisch gültig sind, muss er die Baumarten der Bäume manuell zuweisen. Mit seiner Methode erreichte er eine mittlere Höhengenaugigkeit von 6,4 m. Ebenso verwendet [Király, 2007a] eine Extrapolation, welche durch den linearen Zusammenhang der

Durchmesser und der dazugehörigen relativen Höhen für jeden Baum berechnet wird. Angegeben wird eine erzielte mittlere Höhengenaugigkeit von 2,4 Meter.

### 2.8 Übersicht Forschungsstand

Bisherige Arbeiten teilen die Auswertung der Punktwolken im Wesentlichen in die Teilaufgaben Geländeoberfläche, Baumdetektion, Durchmesserbestimmung und Baumhöhenbestimmung. Zur Ermittlung der Geländeoberfläche werden zwei Ansätze vorgestellt, welche mit Hilfe eines zu Grunde liegenden Rasters für jede Rasterzelle einen Höhenwert bestimmt. Die erste Methode definiert das Gelände an dem Punkt mit dem geringsten Z-Wert innerhalb einer Rasterzelle. Beim zweiten Ansatz wird die Häufigkeit aller Z-Werte innerhalb der Rasterzelle untersucht. Beide Verfahren erforderten nachträglich eine Bereinigung von Ausreißern. Für die Baumdetektion verwendeten die vorgestellten Arbeiten eine reduzierte Punktmenge. Diese definiert sich durch eine Schicht, welche sich in paralleler Lage über der Geländeoberfläche befindet. In der entstehenden Punktmenge kann durch Untersuchung von Häufigkeiten oder unter Nutzung von Bildverarbeitungsalgorithmen eine Baumdetektion erfolgen. In [Aschoff, 2004b] lieferten die Bildverarbeitungsalgorithmen in diesem Zusammenhang nicht zufriedenstellende Detektionsraten. Zusätzlich entstehen durch das mobile Messprinzip an den Stammquerschnitten keine vollständigen Kreise, sondern eher Sichel. Eine ausreichende Zuverlässigkeit für praktische Anwendungen ist nicht gegeben, wodurch diese Herangehensweise nicht weiter verfolgt wird. In der Durchmesserbestimmung kamen Verfahren der statistischen Fehlerrechnung zum Einsatz. Als mathematische Modellkörper werden dazu, ausgehend von zweidimensionalen Daten, Kreise verwendet. Bei der Analyse dreidimensionaler Daten werden Baumabschnitte stattdessen durch Zylinder approximiert. Durch die nach oben verlaufende Verjüngung des Durchmessers entlang eines Baumes kann ein Zylinder nicht den gesamten Stamm genau abbilden. Aus diesem Grund wird die Länge des Zylinders beschränkt. Zur Ermittlung der Stammform werden Verfahren der Durchmesserbestimmung gestaffelt in verschiedenen Stammhöhen angewandt, miteinander verglichen und in diesem Zuge auf Plausibilität geprüft. Die direkte Messung der Baumhöhen aus der Punktwolke

konnte auf der geringen Punktverteilung im Baumkronenbereich bislang nicht zufriedenstellend erfolgen. In diesem Zusammenhang wird untersucht, ob durch das mobile Messverfahren gegebenenfalls eine Verbesserung der Punktabdeckung im Kronenbereich erzielt werden kann.

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Untersuchungsgebiet

Bisherige Arbeiten nutzen sowohl Nadel- als auch Laubwaldbestände als Versuchsf lächen. Bei dem Versuchsstandort handelt es sich um einen mehrschichtigen Laubmisch-Bestand bei Potsdam-Bornim. Der Hauptbestand besteht aus Bäumen im Alter zwischen 40 und 60 Jahren. Vorkommende Baumarten sind Buche, Eiche, Robinie, Ahorn und Linde. Es handelt sich um nahezu ebenes Gelände ohne starke Neigung oder Geländesprünge.

### 3.2 Datenaufnahme

Die Datenaufnahme wurde im Januar 2012 vom Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) durchgeführt. Die Messung erfolgte außerhalb des Belaubungszustandes der Bäume, um den Einfluss von vorhandenem Buschwerk und Bodenvegetation zu minimieren. Im Rahmen der Messung waren die technischen Voraussetzungen für eine dynamische Positionierung während der Messfahrt nicht gegeben. Um Unruhen des Fahrzeuges und der Messeinrichtung möglichst gering zu halten, wurde ein Messgebiet ausgewählt, welches auf einem ebenen Weg befahren werden konnte. Die Berechnung der kontinuierlichen Positionsänderung der Fahrzeugstandorte erfolgte auf Basis einer konstanten Geschwindigkeit. Das Messfahrzeug ist die gesamte Messstrecke konstant mit 1,3 km/h gefahren. Abweichend zur gekrümmten Form des Messweges werden die Messpunkte für eine gerade Fahrachse (X-Achse) abgebildet. Daher ist die Punktwolke linear auf die Fahrachse referenziert. Entgegen einer der Wirklichkeit entsprechenden Punktwolke ermöglicht es diese Eigenschaft spezielle Methoden für das MLS-Erfassungsprinzip zu entwerfen.



Abbildung 6: Messfahrt entlang des Baumbestandes



Abbildung 7: Übersichtsbild der Messfahrt

**Sensor** Bei dem verwendeten Sensor handelte es sich um den Scanner „ALASCA XT“ der Firma Ibeo, welcher ursprünglich für die Automobilbranche entwickelt wurde, um Daten für automatische Hindernis-Erkennung und Spurführung zu erfassen. Befestigt am Messfahrzeug hat dieses Gerät einen Scanbereich von  $180^\circ$  in vertikaler und  $3,2^\circ$  in horizontaler Richtung. Die Richtungsgenauigkeit des Scanners beträgt  $0.25^\circ$  [Scholz, 2006].

### 3.3 Datenhaltung

Als Ausgangsdaten des Messgebietes standen ASCII-Dateien im Reintext zur Verfügung. Durch diese nicht-binärisierten Daten entsteht ein hohes Datenaufkommen.

Diese sind für einen wiederkehrenden Zugriff umständlich, da die Dateien stets komplett gelesen werden müssen. Für die permanente Speicherung der Punktdaten wird im Rahmen dieser Arbeit eine stabile, langlebige Variante benötigt, bei der ein Zugriff über einfache Schnittstellen gewährleistet ist. Um diese Bedingungen zu erfüllen, werden die Punktdaten in das Datenbanksystem PostgreSQL 9.0 in Verbindung mit der räumlichen Erweiterung PostGIS (Version 1.5) importiert. Da in der Arbeit generell eine stabile funktionelle Vorgehensweise für Versuchszwecke im Vordergrund steht, ist die Schnelligkeit der Datenverarbeitung als zweitrangig einzuordnen. Die zum Datenbank-Import notwendige Implementierung erfolgte, wie alle weiteren dieser Arbeit, in der objektorientierten Programmiersprache VB.Net. Als Entwicklungsumgebung kommt das quelloffene Programm SharpDevelop zum Einsatz. Zur Anbindung der Datenbank an die .Net-Umgebung wird das Paket Npgsql verwendet.

## 3.4 Datensichtung

Zur ersten Einschätzung des Datensatzes wird zunächst die Verteilung der Messpunkte in Streudiagrammen dargestellt. Entlang der X-Achse ist das Messfahrzeug gefahren. Die Y-Werte repräsentieren den senkrechten Abstand zur Fahrachse.

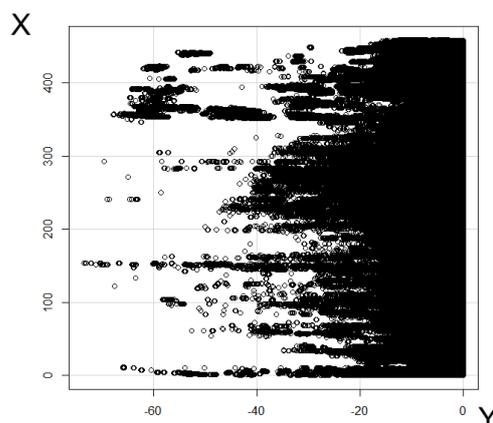


Abbildung 8: Streudiagramm der X- und Y-Werte

Im Streudiagramm zur X/Y-Verteilung wird deutlich, dass mit zunehmender Entfernung vom Messfahrzeug die Punktdichte abnimmt. Für die meisten X-Werte

gibt es keine Punkte, die mehr als 40 m entfernt liegen. Demzufolge ist es unwahrscheinlich Bäume in einer größeren Entfernung zu detektieren.

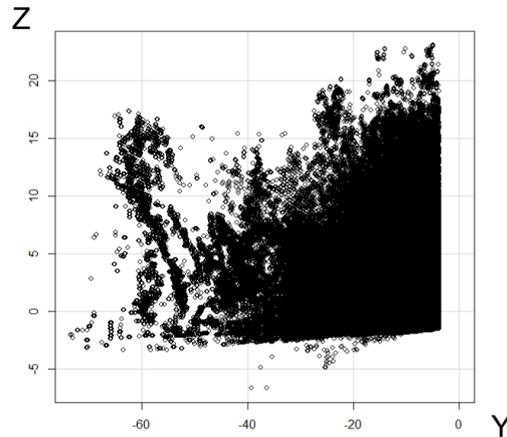


Abbildung 9: Streudiagramm der Y- und Z-Werte

Beim Y/Z Streudiagramm ist eine stark rechtslastige Punktverteilung zu erkennen. Dabei sind die Punkte wie ein Kreisausschnitt angeordnet, dessen Kreismittelpunkt die Messeinrichtung darstellt ( $Y=0$ ,  $Z=0$ ). Im Gegensatz zur X/Y-Streuung besteht für den Nahbereich ( $Y < 15$  m) in Z-Richtung eine hohe Punktdichte bis 17 m, welche mit zunehmenden Y-Werten abnimmt. Die Messung erfolgte vom Waldweg aus, sodass oftmals Buschwerk die eigentlich zu erfassenden Bäume verdeckt. Daher wurden anteilig nur wenige Punkte außerhalb des gedachten Kreisausschnittes gemessen.

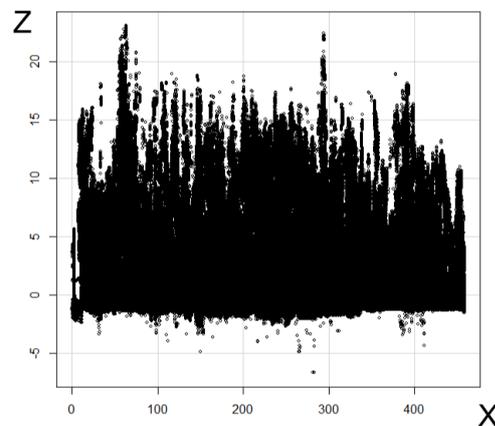


Abbildung 10: Streudiagramm der X- und Z-Werte

Das X/Z -Streudiagramm zeigt eine konstante Verteilung der Z-Werte entlang der

X-Achse. Damit ist zumindest die Durchdringung der Punkte nach oben hin einheitlich.

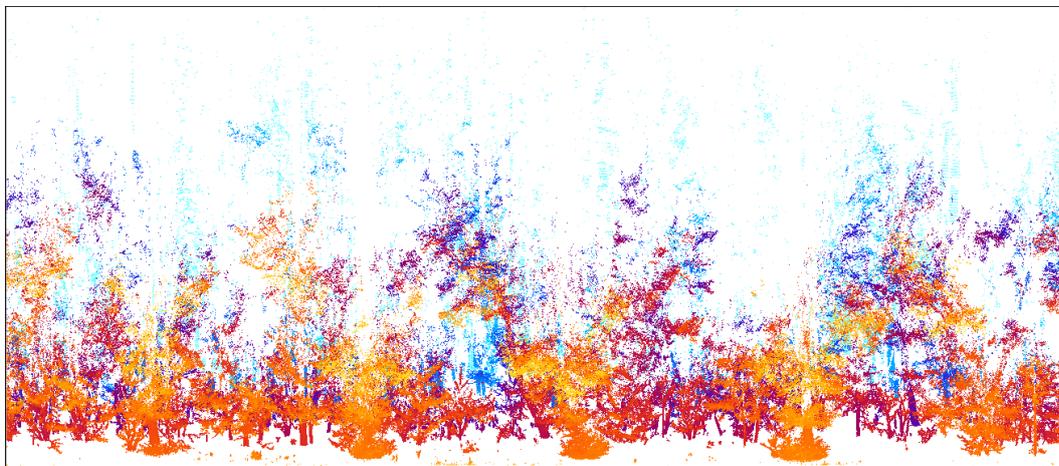


Abbildung 11: Ausschnitt Punktvolke (coloriert nach Abstand vom Scanner (Y-Werte))

Als Referenz wird innerhalb des vorgestellten Baumbestandes eine Fläche von 30 x 30 m abgesteckt. Diese Fläche erstreckt sich entlang der nördlichen Seite des Weges und entspricht etwa dem Ausschnitt in Abbildung 11.

## 3.5 Referenzmessung

Die ausgewählte Versuchsfläche zeichnet sich aus durch einen heterogenen Baumbestand. Die Stammdurchmesser und die Baumhöhen sind daher in verschiedenen Größenordnungen vorhanden. Somit kann angenommen werden, dass hieraus resultierende Auswertemethoden allgemein gültig sind.

### 3.5.1 Bestimmung von Baumpositionen und Brusthöhendurchmessern

Im Zuge der Referenzmessung werden die Baumpositionen tachymetrisch erfasst. Zum Einsatz kam dabei das Tachymeter Leica TPS700.



Abbildung 12: Tachymetrische Referenzmessung

Erfasst wurden die Lage von 41 Bäumen inklusive der Baumart. Nachträglich wird für diese Bäume der Brusthöhendurchmesser mit einer Kluppe gemessen.



Abbildung 13: Referenzdatenbestand

Anhand der Karte in Abbildung 13 ist erkennbar, dass der vorliegende Teil des Bestandes weder regelmäßig noch geklumpt aufgebaut ist [Gadow, 2003]. Es handelt sich stattdessen um eine zufällige Verteilung der Baumstandorte.

### 3.5.2 Bestimmung der Baumhöhen

Um den Fehlereinfluss bei einer manuellen Bestimmung der Baumhöhen zu vermeiden, werden hierfür Daten einer luftgestützten Laserscanner-Erfassung verwendet. Die Stadtverwaltung Potsdam stellte diese Daten bereit, welche im März 2010 erfasst wurden. Die Punktwolken dieser Befliegung sind bereits georeferenziert und vorklassifiziert in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte und Punkte des ersten Echos.

Zur Auswertung der luftgestützten Laserscannerdaten werden für jeden tachymetrisch erfassten Baum Zonen gebildet. Hierzu wird das im GIS-Umfeld übliche Verfahren zur Erzeugung von Voronoi-Diagrammen [de Lange, 2006] verwendet. Während die Höhe des Baumfußpunktes durch den nächstgelegenen Scanpunkt der Klasse Bodenpunkte beschrieben wird, erfolgt über die jeweilige Voronoi-Zone die Zuweisung des höchsten Punktes jedes Baumes. Dies geschieht entsprechend dem Prinzip für die Ableitung von Oberflächenmodellen über die klassifizierten Punkte des ersten Echos [Kraus, 2004].

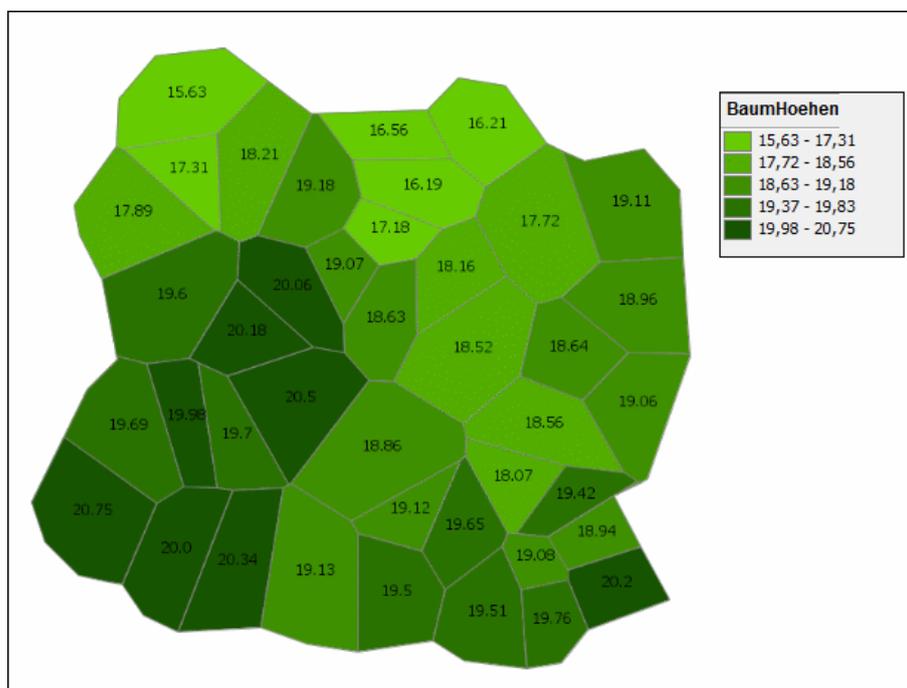


Abbildung 14: Referenz-Baumhöhen aus ALS-Daten auf Basis von Voronoi-Diagrammen (Einheiten in Meter)

## 3.6 Bestimmung der Geländeoberfläche

Im Abschnitt 3.3 werden zwei Verfahren zur Geländeextraktion vorgestellt. Versuchsweise wird mit beiden Verfahren probiert das Geländemodell zu erstellen.

### 3.6.1 Minimalwert der Höhe

Zur Erzeugung des Geländemodells wird zunächst für das Messgebiet ein gleichmäßiges Gitter definiert. Abweichend zu [Simonse, 2003] (0,5 m) wird in dieser Arbeit eine Rasterweite von 3 m benutzt, um Rechenzeit einzusparen. Da das Messgebiet ein flaches Profil vorweist, sind durch diesen Generalisierungsschritt keine gravierenden Auswirkungen zu erwarten. Jetzt wird der geringste Z-Wert der beinhalteten Punkte einer Rasterzelle herausgefiltert. Durch die dreidimensionale Visualisierung (siehe Abbildung 15), wird sich ein erster Eindruck des erstellten Geländemodells verschafft.

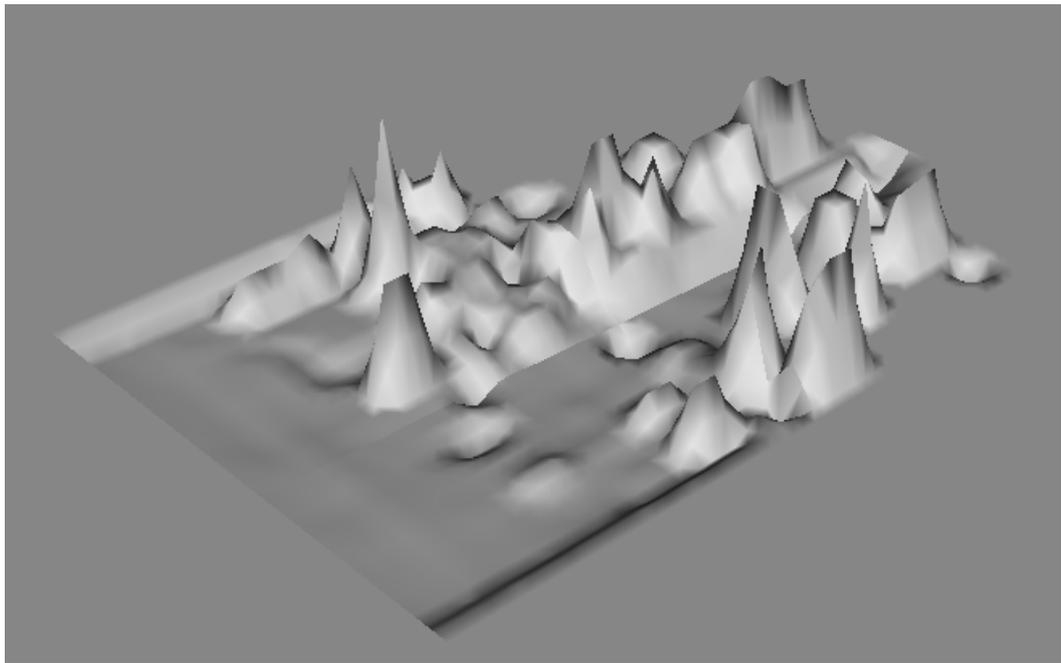


Abbildung 15: 3D-Visualisierung für Minimalwert der Höhe bei einer Rasterweite von drei Metern

Bis zu einem Fahrzeugabstand von 15 m wird das Gelände ohne grobe Fehler generiert. Mit steigendem Abstand zum Messfahrzeug kam es jedoch vermehrt zu Ausreißern. Während im Nahbereich verlässliche Höhenwerte zu Stande kommen, gibt es in weiter entfernten Bereichen Rasterzellen, an denen kein Messstrahl den

Erdboden erreicht hat. In diesen Zellen gibt es dennoch Punkte. Nimmt man nun den geringsten Z-Wert dieser Zelle als Gelände an, so entsteht ein falscher Höhenwert. Der Großteil der Ausreißer befindet sich über der Erdoberfläche. An Hand der Streudiagramme der Abbildungen 9 und 10 ist zu erkennen, dass einige Punkte unterhalb der Erdoberfläche liegen. Solche sogenannten Geisterpunkte [Bienert, 2007] entstehen beispielsweise durch Mehrwegeeffekte der Messstrahlen. Sie kommen jedoch nur in geringem Maße vor. Grundsätzlich steigt mit zunehmendem Abstand auch die Anzahl der Ausreißer. Um ein zuverlässiges Geländemodell über 15 m hinaus ableiten zu können, müssen die Ausreißer herausgeflitert werden, die sich nicht in ein homogenes Relief einfügen.

#### **3.6.2 Histogramme**

Für unterschiedliche Abstände zum Scanner werden Histogramme erzeugt (siehe Abbildung 16). Konform zur Methode mit niedrigsten Z-Wert, werden die Histogramme auf Grundlage von Voxeln mit einer Grundfläche von 3 x 3 m berechnet.

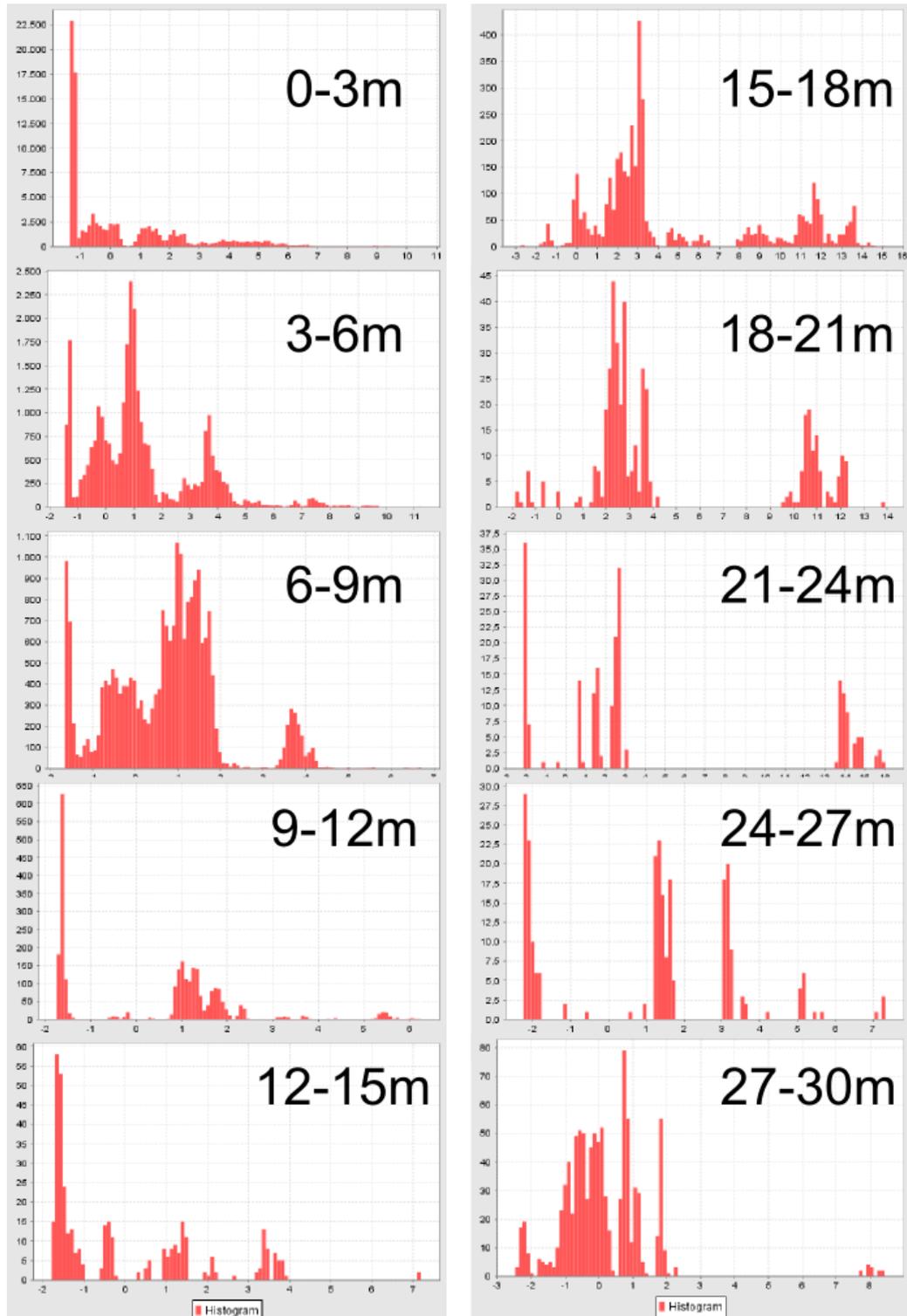


Abbildung 16: Histogramme der Voxel mit 3 x 3m Grundfläche für verschiedene Abstände

In dem entstehenden Histogrammen stehen die horizontalen Achse als Z-Werte, während die vertikalen Achse den Anzahlen der Punkte entsprechen. Die fettgedruckten Zahlen beschreiben die Entfernung zum Sensor. An Hand der Histo-

gramme wirken sich diese Anhäufungen als globales oder lokales Maximum aus. Abweichend zu [Bienert, 2007], die das Gelände am globalen Maximum fixiert, ist an Hand der gezeigten Histogramme davon auszugehen, dass das lokale Maximum mit dem niedrigsten Z-Wert gleich dem genäherten Gelände ist. Hinzukommend ist zu sehen, dass der Ausschlag des ersten Maximums stark variiert. Er nimmt jedoch mit steigender Entfernung ab. Im Allgemeinen ist durch die geringere Punktabdeckung eine Aussage für entferntere Bereiche als weniger zuverlässig einzuschätzen. Neben den gezeigten Histogrammen gibt es auch jene, bei denen an der Geländehöhe kein Punkt vorliegt. Wie beim Verfahren mit niedrigstem Z-Wert entsteht dabei ein Ausreißer, welcher nachträglich herausgefiltert werden muss.

#### 3.6.3 Vergleich

Beide Verfahren liefern eine nicht reine Geländeoberfläche mit Ausreißern. Jedoch bietet die Histogrammauswertung mit dem Wert des lokalen Maximums mit niedrigstem Z-Wert mehr Sicherheit gegenüber unterirdischen Geisterpunkten. Entgegen dieser Einschätzung wird für die weitere Analyse dennoch das berechnete Raster mit dem niedrigsten Z-Wert verwendet. Dies geschieht in Anbetracht der Tatsache, dass zum einen durch beide Verfahren Aufreiser entstehen und zum anderen um eine aufwendige Implementierung der Histogrammauswertung zu vermeiden.

#### 3.6.4 Ausreißerdetektion

Das vorliegende Messgebiet ist nahezu eben. Daher sind kleinräumige Geländestufen nicht zu erwarten. [Simonse, 2003] vergleicht die Neigung zwischen benachbarten Rasterzellen, um auf Ausreißer zu schließen. Verändert sich die Neigung sprunghaft, ist davon auszugehen, dass es sich um einen Ausreißer handelt. Dementsprechend wird nach Stellen mit starker Neigung gesucht. Ausgehend von der Fahrachse (Abstand = 0 m) werden dazu rechtwinklig nacheinander alle Neigungen zwischen den Rasterzellen durchlaufen. Zur Prüfung des extrahierten Geländes werden alle Punkte herausgefiltert, die zu ihrem Vorgänger einen Höhenunterschied von mehr als 50 cm aufweisen. Dabei werden (ausgehend von der Fahrachse) der Reihe nach alle Punkte (Raster-Zellen) mit gleicher Station untersucht. Dies erfolgt auf Grund

der Annahme, dass (wie in Abbildung 15 gezeigt) in den sensornahen Bereichen von verlässlichen Geländehöhen ausgegangen werden kann.

Auf diese Weise wird bereits ein zufriedenstellendes Ergebnis für die Geländeprüfung erreicht, so dass auf eine Prüfung in orthogonaler Richtung verzichtet werden kann. Im nächsten Schritt werden die Ausreißer aus dem Raster entfernt. Über die Positionen der übrigen Z-Min-Punkte wird das Gelände mit der Interpolationsmethode Inverse-Distanz-Gewichtung [de Lange, 2006, S. 358-359] auf das gesamte Untersuchungsgebiet übertragen. Das erstellte Geländemodell bildet die Grundlage für die weiteren Analysen.

## **3.7 Baumdetektion**

Im Abschnitt 3.4 werden verschiedene Verfahren zur Baumdetektion aus einer um das Gelände reduzierten Punktwolke vorgestellt. [Aschoff, 2004b] erreicht mit der Rasterfizierung in Verbindung mit der Hough-Transformation nur geringe Detektionsraten. In Anbetracht der Genauigkeit und Streuungseigenschaften des hier benutzten Sensors und der niedrigen Detektionsraten von [Aschoff, 2004b] ist eine Zuverlässigkeit für die vorliegenden Daten nicht gegeben. Abweichend dazu detektiert [Bienert, 2007] die Baumstandorte durch Punktdichten in verschiedenen Höhen und erreicht damit eine Detektionsrate von 94 %.

### **3.7.1 Relative Punktdichte**

Die Baumdetektion erfolgt ähnlich zu [Bienert, 2007] über die Betrachtung der Punktdichte. In einem das Messgebiet überspannenden Raster (Rasterweite 50 cm) wird in drei verschiedenen Höhenintervallen die Punktdichte untersucht. Durch die geringe Scanauflösung sind in entfernten Bereichen nur wenige Punkte entlang eines Baumstammes vorhanden. Aus diesem Grund müssen die Slicing-Schichten abweichend zu [Bienert, 2007] dicker definiert werden. Da es sich hierbei allein um die Detektion der Bäume handelt, wird eine Schichtdicke von 1,25 m festgelegt. Innerhalb einer Rasterzelle stellt diese Schicht einen Quader dar. Die vertikale Ausrichtung dieser quaderförmigen Voxel bewirkt eine höhere Sensibilität für vertikal dicht

angeordnete Messpunkte. Die Lagerung der Schichten in drei verschiedenen Höhen bewirkt, dass der Einfluss kleiner abgeschatteter Stammbereiche reduziert wird. In jeder 50 mal 50 cm großen Rasterzellen wird für jede der drei Schichten die Anzahl der beinhaltenden Punkte ermittelt. Für das Untersuchungsgebiet entstehen dadurch drei verschiedene Ergebnisraster, welche anschließend analysiert werden.

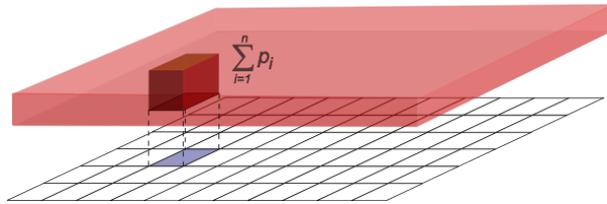


Abbildung 17: Slicing-Schicht und Raster-Vereinfachung

[Bienert, 2007] verwendete eine Mindestanzahl von beinhalteten Punkten je Rasterzelle als Detektionsgrundlage. Die Punktabdeckung variiert jedoch je nach Entfernung vom Sensor (siehe Abbildung (18)). Aus diesem Grund wird eine relative Variable hinzugefügt, welche gleichzeitig die direkte Nachbarschaft mit einbezieht. Genauer wird hierbei, über einen Filter, nach lokalen Maxima in den entstandenen drei Rastern gesucht. Das erfolgt über den Durchlauf einer 3 x 3-Matrix (Implementierung siehe Anhang). Zusätzlich wird eine Mindestanzahl von 50 Punkten pro Rasterzelle vorausgesetzt.

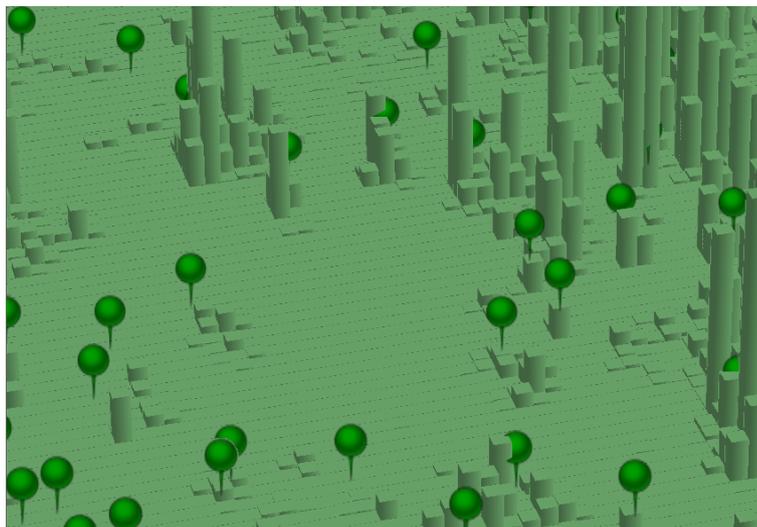


Abbildung 18: 3D-Visualisierung der Punktzahl je Rasterzelle (Grüne Pins sind Baumstandorte der Referenzmessung.)

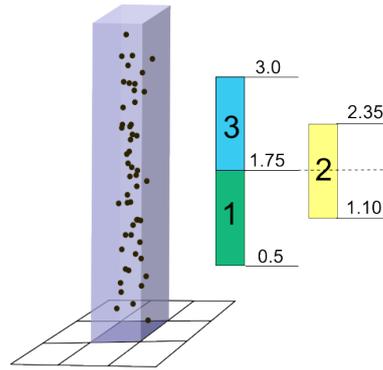


Abbildung 19: Lagerung der Slicing-Schichten zur Baumdetektion

### 3.7.2 Gruppierung

Im diesem Schritt werden äquivalente Detektionen der drei Ergebnisse gesucht und gruppiert. Für eine positive Detektion müssen mindestens zwei gefundene Maxima zusammenpassen. Die Gruppierung der Detektionen aus drei Höhenintervallen erfolgte wie bei [Klemmt, 2008] durch den dichtebasierenden Cluster-Algorithmus DBSCAN [Ester, 1996]. Als diesbezügliche Bedingungen wird ein Epsilon als Maximalabstand von 0,8 m sowie eine Mindestanzahl von 2 Punkten aus zwei verschiedenen Rastern festgelegt. Zur Vereinfachung des DBSCAN - Algorithmus erfolgt die Implementierung auf Basis konvexer Hüllen und Puffern (siehe Anhang). Das hat den Vorteil, dass die Cluster-Zuordnung über im GIS-Umfeld übliche Geoprozesse erfolgen kann. Die Detektion von lokalen Maxima in drei verschiedenen Höhenintervallen ermittelte 105 gruppierte Maxima in einem Bereich der 41 erfassten Bäume im Untersuchungsgebiet.

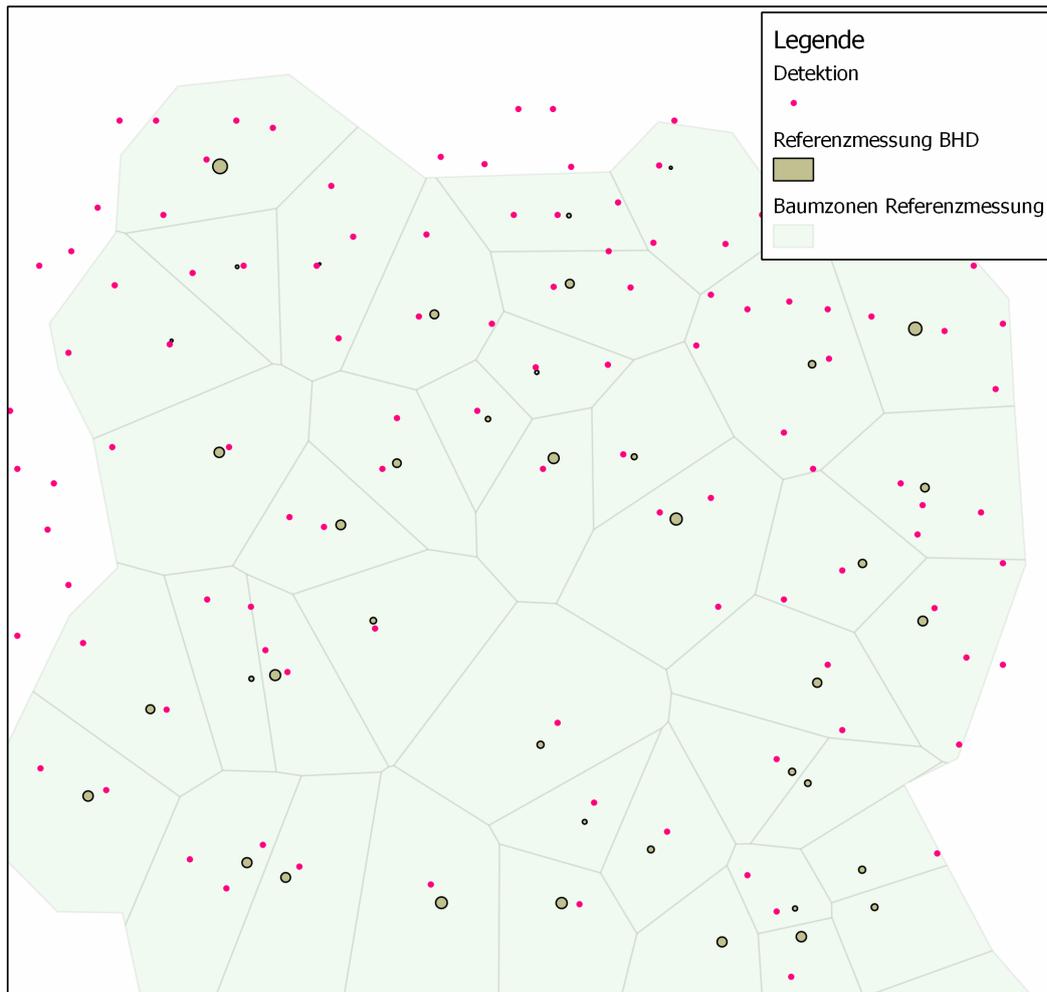


Abbildung 20: Gruppierte detektierte Bäume

Abbildung 20 zeigt die gleichzeitige Darstellung der detektierten Bäume und der Baumpositionen aus der Referenzmessung. Bis zu einer Entfernung von 30 m befinden sich Detektionen an sämtlichen Baumstandorten. An Hand der Abbildung ist zu erkennen, dass mehr Detektionen vorliegen als tatsächliche Bäume. Im folgenden Abschnitt werden die Detektionen einzeln untersucht, um auf echte Baumstandorte zu schließen.

## 3.8 Stammanalyse

Die Stammformen sind je nach Baumart unterschiedlich. Während der Stamm von Nadelbäumen etwa einem Kegel ähnelt, bei dem der Stamm sich bis zur Baumspitze erstreckt, löst sich bei ausgewachsenen Laubbäumen der Stamm in der Krone auf [Kramer, 1982, S.49]. Vernachlässigt man die Krümmung des Baumes, dann ist es die Abholzigkeit des Baumschaftes (Verlauf, der sich nach oben hin entwickelnde Verjüngung des Baumdurchmessers), welche das eigentliche Stammvolumen repräsentiert [Gadow, 2003]. Im Gegensatz zum stationären Laserscanning sind beim mobilen Scan-Verfahren weniger Punkte entlang des Baumstammes zu erwarten, da die Dichte der Punkte zusätzlich von der Geschwindigkeit der Scan-Einrichtung abhängt. Da in dieser Arbeit speziell der Durchmesser in Brusthöhe fokussiert wird, erfolgt die Durchmesser-Interpolation auf Grundlage von ausgleichenden Geraden durch Messwerte die nahe der Brusthöhe liegen.

Grundlage der Stammanalyse ist das mathematische Modell eines Stammes bzw. Stammquerschnitts. In Abschnitt 2.6 werden bisherige Ansätze mit Kreis, Ellipse und Zylinder vorgestellt. Die Qualität der Stammanalyse und der damit verbundenen Durchmesserbestimmung ist abhängig von der gegebenen Punktauswahl. Eine qualitativ schlechte Punktauswahl muss bereinigt werden, um später brauchbare Ergebnisse zu gewinnen. Im Zuge dieser Arbeit wird eine Kreisanpassung verwendet, da auf diese Weise bereits in den Arbeiten von [Bienert, 2007, Simonse, 2003, Thies, 2003] gute Ergebnisse erzielt werden. Jedoch erfolgt dabei ausschließlich die Untersuchung kleinerer Gebiete. Bei den dort verwendeten kleineren Punktwolken fällt die Arbeitszeit der Form-Anpassung nicht so sehr ins Gewicht. Es muss geprüft werden, ob eine leistungsfähige Prozessierung von Massendaten erfolgen kann.

### 3.8.1 Punktauswahl

Vor der Durchmesserbestimmung wird zunächst für den jeweiligen detektierten Baumstandort eine Punktmenge generiert. Hierzu wird ein Puffer mit Radius von einem Meter um den Detektionspunkt gelegt. Alle Punkte innerhalb des Puffers gehören der zu analysierenden Punktmenge an. Durch das zu Grunde liegende Raster

der Baumdetektion mit einer Rasterweite von 0,5 m, kann es vorkommen, dass Bäume nur teilweise innerhalb des Auswahlpuffers liegen. Jedoch würde bei Nutzung eines größeren Puffers ein größerer Einfluss von Nachbarbäumen bestehen. Durch die zweidimensionale Betrachtung ist nicht auszuschließen, dass der Stamm im oberen Baumbereich möglicherweise nicht im Inneren des Puffers liegt. Die Durchmesserbestimmung zielt jedoch vornehmlich auf die Ermittlung des Brusthöhendurchmessers ab. Aus diesem Grund wird ausschließlich der Stammbereich von 0,5 m bis 4,5 m über dem Boden analysiert.

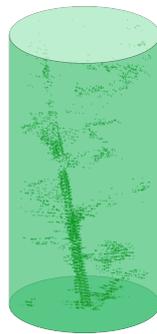


Abbildung 21: Punktauswahl für einen detektierten Baumstandort

Nach dem durchgeführten Clipping befinden sich neben den eigentlichen Baum-  
punkten auch Störpunkte in der Punktauswahl. Diese müssen entfernt werden,  
bevor Algorithmen der Durchmesserbestimmung angewendet werden können. In  
diesem Abschnitt werden verschiedene Ansätze zur Verbesserung getestet, um die  
Daten optimal für die Kreisanpassung vorzubereiten.

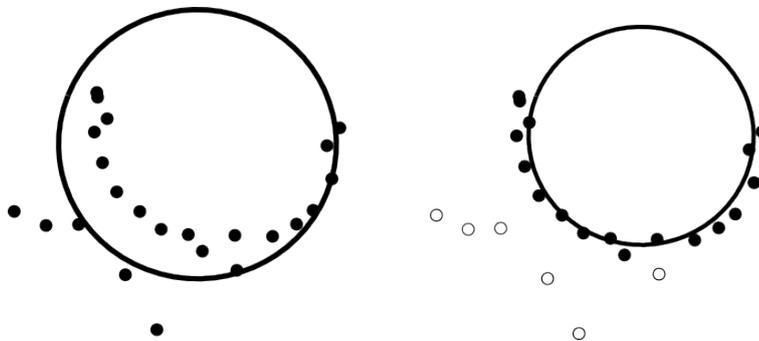


Abbildung 22: Prinzip Kreisanpassung mit einfacher und verbesserter Punktauswahl

### 3.8.2 Verfahren zur Verbesserung der Punktauswahl

**Abweichung vom mittleren Radius** Zuerst werden während der Kreisausgleichung iterativ die Punkte mit dem größten Abstand zum mittleren Kreis aussortiert. Diese Maßnahme bewirkt jedoch in den meisten Fällen, dass der vorher berechnete Kreis kaum verändert wird. Durch Aussortieren der vermeintlichen Ausreißer wird stattdessen der falsche Kreis gefestigt. Das Ergebnis der Kreis Anpassung ist daher stark abhängig von der gegebenen Punktauswahl. Um dieser Abhängigkeit entgegen zu wirken, ohne eine Verkleinerung des Auswahlradius vorzunehmen, muss die Punktauswahl vorher spezifisch analysiert werden. In der Punktauswahl wurde zu diesem Zeitpunkt keine Säuberung durchgeführt.

**Clustering** Zuerst wird angenommen, dass an der Stelle des Baumes die höchste Punktdichte innerhalb einer Schnittebene vorliegt. Um diesen Hotspot zu detektieren wird der vereinfachte Ansatz des dichte basierenden Clusteralgorithmus DBSCAN (Abschnitt 3.7.2) verwendet. Startwert für die nachfolgende bereinigte Kreisgleichung ist der Schwerpunkt des Clusters mit den meisten zugehörigen Punkten. Als DBSCAN-Parameter werden Epsilon mit 4 cm (maximaler Punktabstand innerhalb des Clusters) und die Mindestanzahl der Punkte je Cluster mit 20 Punkten verwendet. Diese Methode liefert jedoch für Bereiche mit hohem Astanteil keine zuverlässige Ausschussrate. Hotspots werden dabei oft im Astbereich erkannt.

Beim zweiten clusterbasierten Ansatz wird für den gesamten Auswahlzylinder eine 2D-Clustering in der  $x/y$ -Ebene durchgeführt. Beinstellung sowie Schrägstand bewirken dabei, dass Cluster größer werden als der eigentliche Stammbereich. Zusätzlich führt diese Methode bei sensornahen Auswahlzylindern mit mehr als 10 000 Punkten zu langen Rechenzeiten, wodurch eine schnelle Datenanalyse nicht gewährleistet ist.

**Sichelform** Die Punktstreuung in einer Baumschicht ist nicht zufällig, sondern sie verlagert sich unterschiedlich auf die Koordinatenachsen. Sie ähnelt in ihrer Form einer Sichel (vgl. [Király, 2007b]). So ist für die Punktmenge an einen Baumquerschnitt in Y-Richtung eine geringere Streuung zu erwarten als in X-Richtung.

Es wird festgestellt, dass die Standardabweichung der Ordinatenwerte kleiner sein müssen als die der Abszissenwerte. Jedoch sind bei Bäumen mit schmalen Durchmesser die Streuungen nahezu gleich.



Abbildung 23: Sichelförmige Punktverteilung

**Streuung der Punktauswahl** Messpunkte kommen an einem Baum konzentriert vor. Ist die Streuung um den Mittelwert hoch, so ist die Qualität der Punktauswahl schlecht. Ungeachtet von einer potentiellen Schiefstellung des Baumes, wird die Streuung der Lage um den Schwerpunkt betrachtet. Anhand der Abweichung jedes Punktes zum Mittelwert der Punktauswahl wird versuchsweise getestet, mit welchem Vielfachen der Standardabweichung Ausreißer am besten eliminiert werden kann. Durch die Analyse des Höhenabschnittes von vier Metern wird vermutet, dass extreme Schiefstellungen von Baumstämmen zu Fehlinterpretationen führen. Beim Testen werden jedoch auch Bäume erfolgreich berechnet, welche bei vier Meter Höhenunterschied eine Lagedifferenz der Stammmittelpunkte von 0,5 m aufwiesen. Das Zweifache der Standardabweichung als Schwellwert zur Ausreißererkennung erzielt die besten Ergebnisse. Durch die Analyse der Streuung der gesamten Punktauswahl erfolgt eine zufriedenstellende Bereinigung bei Punktmengen mit geringen Laub- und Astanteil. Ein Großteil von unplausiblen Detektionen wird somit vermieden. In sensornahen Bereichen mit mehr Astwerk können jedoch Fehlinterpretationen nicht ausgeschlossen werden.

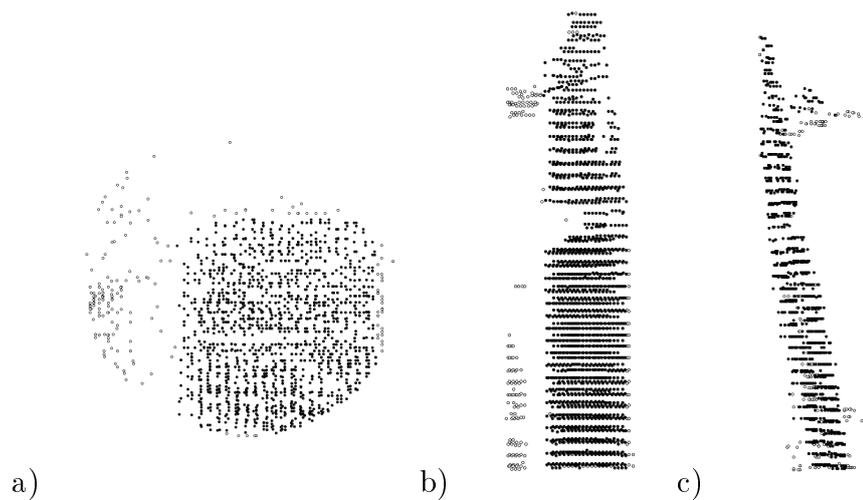


Abbildung 24: Punktauswahl für detektierten Baum, a) Draufsicht, b) und c) Seitenansicht

### 3.8.3 Abschattung

Ausgehend vom vorbeifahrenden Sensor schatten Bäume die Messstrahlen ab. Das bedeutet, dass (ungeachtet von Pseudopunkten) unmittelbar hinter jedem Baum kein Messwert sein kann. Diese grundlegende durch das MLS-Messprinzip zu Stande kommende geometrische Eigenschaft innerhalb der Punktwolke wird bislang nicht betrachtet.

Hierzu wird zunächst die Anordnung innerhalb der Punktauswahl in Bezug auf das mobile Messverfahren modelliert. Ein vorbeifahrender Sensor erfasst ausschließlich die Vorderseite der Bäume. Somit liegt die Rückseite eines Baumes im Messschatten. Durch den horizontalen Öffnungswinkel des Sensors ist der Schatten theoretisch nicht unendlich, sondern verjüngt sich mit zunehmender Entfernung vom Sensor. Abstrahiert man dieses Modell auf die gegebene Punktauswahl, so liegt hinter einem Baum kein Messpunkt. Demnach ist der Abstand zum Sensor eine wichtige Größe zur näheren Analyse innerhalb der Punktauswahl. Um eine Analyse für die Punktauswahl durchführen zu können, wird ein zweidimensionales Raster in der X/Z-Ebene mit einer quadratischen Rasterweite von 10 cm aufgespannt. Verschneidet man nun die Punkte mit dem Raster, so können innerhalb einer Rasterzelle statistische Auswertungen für Y-Werte erfolgen (siehe Abbildung 25).

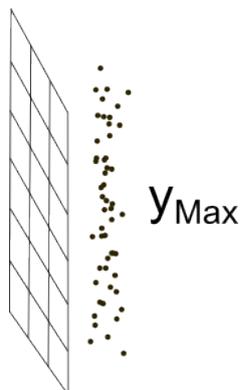


Abbildung 25: Prinzip Auswertung der Y-Werte in X/Z-Raster

Um den Effekt der Messschatten in die Analyse einfließen zu lassen, wird zunächst in jeder Zelle der Punkt mit der höchsten Entfernung ( $y_{Max}$ ) zum Sensor gesucht. In dem entstehenden Raster bilden sich gleichzeitig auch Nullzellen. Also Zellen, in denen sich kein Punkt befindet. Es wird davon ausgegangen, dass Baumbereiche flächige Gebilde in dem Raster darstellen (siehe Abbildung 26). Einzelne verstreute Pixel werden nicht als Stammpunkte angesehen.

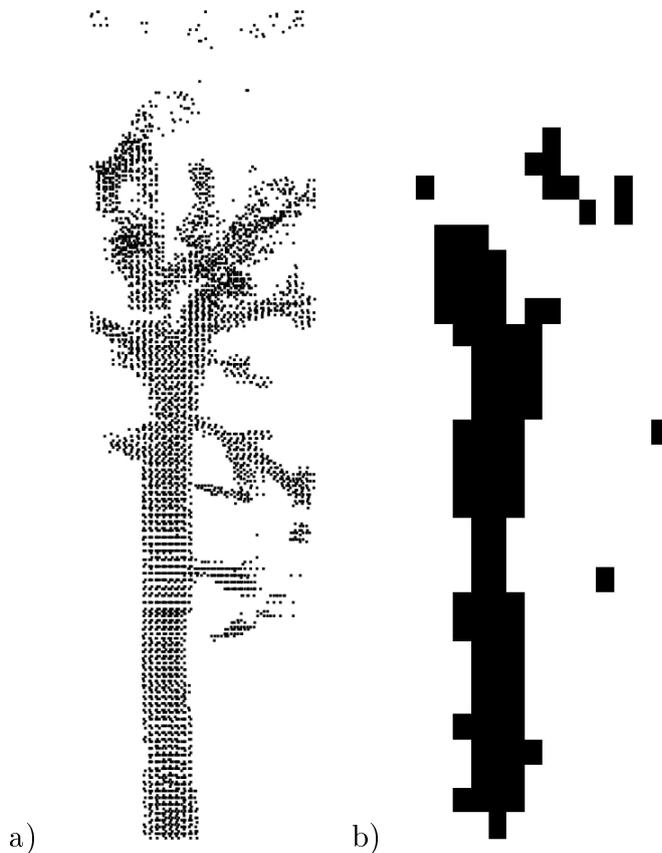


Abbildung 26: Darstellung einer Punktauswahl in X/Z-Ebene a) Streudiagramm  
b) Rasterdarstellung

Unter Nutzung von Zeilen und Spaltenfiltern werden Bereiche innerhalb des Rasters untersucht. Der Spaltenfilter besteht aus einer 1 x 3 - Matrix und prüft, ob die Standardabweichung der drei Werte kleiner als 10 cm ist. Bei dem 3 x 1 Zellen großen Zeilenfilter wird geprüft, ob es sich um zusammenhängende horizontale Bereiche von mindestens zwei Zellen handelt, bei denen die Bedingung des Spaltenfilters zutrifft. Durch diese beiden Bedingungen wird unterschieden, ob es sich eine Rasterzelle auf dem Baumstamm befindet oder nicht. Für die herausgefilterten Pixel werden alle Punkte, die näher als 10 cm an dem Ymax liegen, für weitere Analysen verwendet.

### 3.8.4 Kreisanpassung

Im Wesentlichen gibt es zwei Kategorien für die Ausgleichung eines Kreises. Während die algebraische Kreisgleichung eher eine grobe Bestimmung des Kreises liefert, passt sich die geometrische Kreisanpassung auf Grund geometrischer Eigenschaften in die Punktauswahl ein. Die dabei iterativ rechnenden Algorithmen arbeiten bei großen Punktmengen sehr lange. So brauchte beispielsweise das Programm JAG3D [Lösler, 2012] mit dem Verfahren von [Späth, 2000] 51 Sekunden für eine Kreisgleichung mit 890 Punkten. Beim verwendeten Datensatz entstehen für einen 10 cm hohen Stammabschnitt je nach Messentfernung und Baumdicke Punktmengen bis zu einer vierstelligen Anzahl. Diese würden bei Nutzung der hiesigen iterativ geprägten Algorithmen lange Rechenzeiten benötigen. Aus diesem Grund wird das Verfahren von [Jurisch, 2009] verwendet, welches den best-angepassten Kreisquerschnitt durch Mittelwerte bestimmt und damit wesentlich schneller ist.

#### Berechnung von Startwerten - Algebraischer Fit

$$r^2 = c + x_0^2 + y_0^2$$

$$r^2 = \frac{1}{n} \sum (x_i^2 + y_i^2) - 2\bar{x}x_0 - 2\bar{y}y_0 + x_0^2 + y_0^2$$

$$r^2 = (x_0 - \bar{x})^2 + (y_0 - \bar{y})^2 + \frac{1}{n} \sum x_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum x_i\right) + \frac{1}{n} \sum y_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum y_i\right)$$

$$r^2 = (x_0 - \bar{x})^2 + (y_0 - \bar{y})^2 + \frac{1}{n} \left(\sum (x_i - \bar{x})^2\right) + \frac{1}{n} \left(\sum (y_i - \bar{y})^2\right)$$

$$r^2 = (x_0 - \bar{x})^2 + (y_0 - \bar{y})^2 + \frac{1}{n} \sum x_i'^2 + \frac{1}{n} \sum y_i'^2$$

### 3 Material und Methoden

Arithmetische Mittelwerte der Koordinaten

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i$$

Arithmetische Mittelwerte der Koordinaten-Quadrate

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sum x_i^2 \quad \bar{\bar{y}} = \frac{1}{n} \sum y_i^2$$

Schwerpunktkoordinaten

$$x'_i = x_i - \bar{x} \quad y'_i = y_i - \bar{y}$$

$$x''_i = x_i^2 - \bar{\bar{x}} \quad y''_i = y_i^2 - \bar{\bar{y}}$$

Streuungsmaße

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum x_i'^2 \quad s_y^2 = \frac{1}{n} \sum y_i'^2 \quad s_{xy} = \frac{1}{n} \sum x_i' y_i'$$

Normalgleichungsmatrix

$$N = \begin{pmatrix} s_x^2 & s_{xy} \\ s_{xy} & s_y^2 \end{pmatrix}$$

Bildung der inversen durch Cramersche Regel

$$\frac{1}{s_x^2 s_y^2 - (s_{xy})^2} \begin{pmatrix} s_y^2 & -s_{xy} \\ -s_{xy} & s_x^2 \end{pmatrix}$$

rechte Seite

$$n = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix}$$

$$n_1 = \frac{1}{n} \sum x_i'(x_i'' + y_i'') \quad n_2 = \frac{1}{n} \sum y_i'(x_i'' + y_i'')$$

Startwerte

$$x_0 = \frac{1}{2(s_x^2 s_y^2 - (s_{xy})^2)} (s_y^2 n_1 - s_{xy} n_2)$$

$$y_0 = \frac{1}{2(s_x^2 s_y^2 - (s_{xy})^2)} (s_x^2 n_2 - s_{xy} n_1)$$

$$r^2 = (x_0 - \bar{x})^2 + (y_0 - \bar{y})^2 + s_x^2 + s_y^2$$

**Geometrischer Fit**

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$$

Streuungen

$$s_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - y_0}{d_i} \right)^2$$

$$s_{xy}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_0)(y_i - y_0)}{d_i^2}$$

Mittelwerte

$$\bar{d}_x = \frac{1}{n} \sum \frac{x_i - x_0}{d_i} \quad \bar{d}_y = \frac{1}{n} \sum \frac{y_i - y_0}{d_i}$$

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum d_i$$

$$s_x^2 - \bar{d}_x^2 = \frac{1}{n} \sum \left( \frac{x_i - x_0}{d_i} - \bar{d}_x \right)^2$$

$$s_y^2 - \bar{d}_y^2 = \frac{1}{n} \sum \left( \frac{y_i - y_0}{d_i} - \bar{d}_y \right)^2$$

$$s_{xy} - \bar{d}_x \bar{d}_y = \frac{1}{n} \sum \left( \frac{x_i - x_0}{d_i} - \bar{d}_x \right) \left( \frac{y_i - y_0}{d_i} - \bar{d}_y \right)$$

Normalgleichungsmatrix

$$N = \begin{pmatrix} s_x^2 - \bar{d}_x^2 & s_{xy} - \bar{d}_x \bar{d}_y \\ s_{xy} - \bar{d}_x \bar{d}_y & s_y^2 - \bar{d}_y^2 \end{pmatrix}$$

rechte Seite

$$n = \begin{pmatrix} \bar{x} - x_0 - \bar{d}_x \bar{d} \\ \bar{y} - y_0 - \bar{d}_y \bar{d} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = N^{-1} n$$

Mittelpunkt

$$x_M = x_0 + \Delta x$$

$$y_M = y_0 + \Delta y$$

Radius

$$r_{iM} = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2}$$

$$r_M = \frac{1}{n} \sum r_{iM}$$

### 3.8.5 Analyse der Kreisanpassungen

Wie bereits erläutert, ist die Qualität eines angepassten Kreises abhängig von der gegebenen Punktauswahl. Die vorgestellten Verbesserungsmaßnahmen können nicht alle fehlerhaften Punkte entfernen. Aus diesem Grund entstehen für einen Baum unterschiedlich ausgeprägte Kreisanpassungen (siehe Abbildung 27). Zur Ergebnisvisualisierung des Stammverlaufs werden Höhen/Radius-Diagramme genutzt.

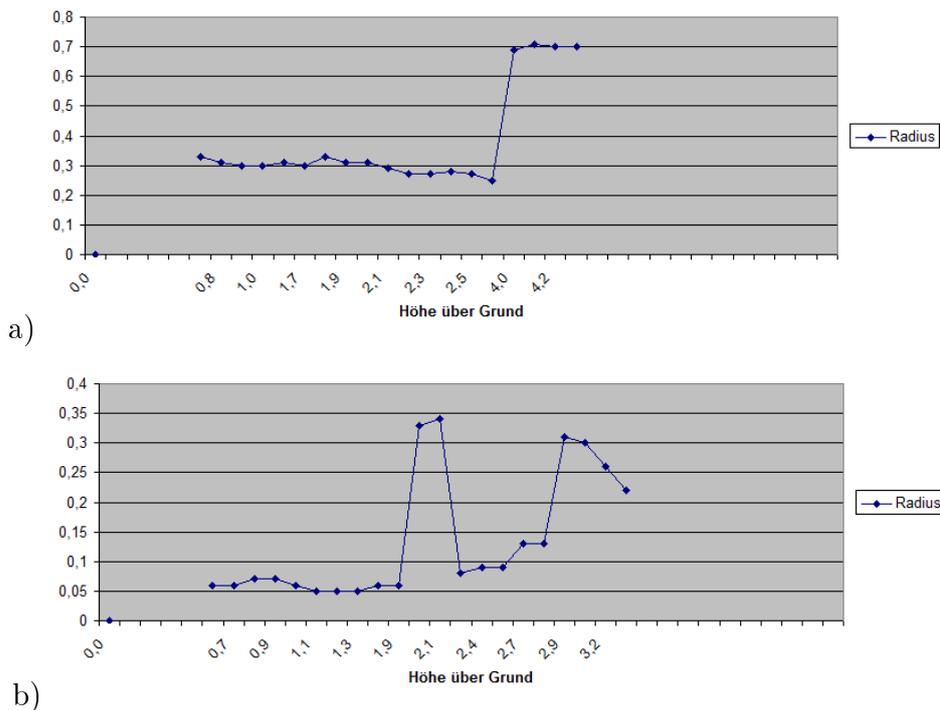


Abbildung 27: Kreisanpassungen für verschiedene Bäume im Höhen/Radius-Diagramm (Einheiten in Meter)

In den beiden Diagrammen aus Abbildung 27 sind die Stammverläufe an den konstanten bis schwach fallenden Werten des Radius zu erkennen. Ungeachtet von Auswüchsen oder Verwachsungen würde der theoretische Stammverlauf eines Baumes im Höhen/Radius-Diagramm stets schwach fallend verlaufen. Die vorliegenden Radiussprünge werden hervorgerufen durch den Einfluss von Astwerk. Der konstante Verlauf nach dem Radiusprung bei Höhe = 4,0 m in a) wird verursacht durch das den Rand des Zylinders für die Punktauswahl (siehe Abschnitt 3.8.1). An Hand der Einsicht in die Höhen/Radius-Diagramme wird davon ausgegangen, dass nur ein kleiner Teil der Kreisanpassungen pro vier Meter Baumstammabschnitt gut

angepasst ist. Der Anteil der Fehlwerte pro Stamm ist daher relativ hoch, um den Stammverlauf mit statistischen Auswerteverfahren zu schätzen. Aus diesem Grund müssen spezielle Bedingungen festgelegt werden, welche die Kreisanpassungen auf Plausibilität prüfen. Ebenso werden in Kiraly [2007b] die ermittelten Kreise durch solche Bedingungen auf Plausibilität geprüft. Er analysiert dabei die Radius-Differenzen und die Verschiebungen der Mittelpunkte. Im Anschluss werden unter anderem diese Bedingungen beschrieben. Gleichzeitig wird versuchsweise getestet, unter welchen Bedingungen eine Plausibilitätsprüfung erfolgen kann.

**Vergleich der Kreise zu Zylinder** Für diesen Ansatz wird angenommen, dass sich bei einer Zylinderanpassung anteilig mehr Punkte auf der gesuchten Modellgeometrie befinden als bei einer schichtbezogenen Kreisanpassung. Die Kreisanpassungen der Einzelschichten müssen dabei natürlich zum Zylinder passen. Trifft das nicht zu, ist der Kreis in der jeweiligen Schicht falsch. Da sich Zylinder nur begrenzt zur Beschreibung von Baumschäften eignen (siehe Abschnitt 2.6.3), erfolgt eine Betrachtung für 50 cm hohe Höhenintervalle. Der Kernbestandteil der Zylinderbestimmung ist die Lage der Zylinderachse. Alle Punkte entlang des Baumstammes sollten den gleichen Abstand zu ihr vorweisen. Die Festlegung der Zylinderachse erfolgt durch eine 3D-Geradenausgleichung auf Grundlage der Mittelpunkte der angepassten Kreise. Zur Vereinfachung der 3D-Geradenausgleichung erfolgt eine getrennte Betrachtung von  $x/z$  und  $y/z$ . Dabei wird zunächst jeweils eine Geradenausgleichung (siehe Abschnitt 3.8.6) in der Ebene durchgeführt. Im Anschluss werden die beiden Geraden in Vektoren umgeformt und schließlich zu einem 3D-Vektor zusammengefügt. Der mittlere Abstand aller Punkte um die ermittelte Gerade stellt den Radius des Zylinders dar. Beim zweiten Ansatz werden Zylinderachsen durch die einzelnen Kreise für 50 cm lange Abschnitte definiert. Die Ergebnisse für die Radien der Zylinder sind bei beiden Methoden eher zu groß. Die gestellte Annahme kann aus diesem Grund für die hier verwendeten Daten nicht bestätigt werden.

**Zentriwinkel** In [Bienert, 2007] bildet der Zentriwinkel einen Indikator für die Güte einer Kreisanpassung. Es wird nun untersucht, ob der Zentriwinkel im Zusammenhang mit der Kreisanpassung und den vorliegenden Daten als Zeiger für die Güte der Kreisanpassung genutzt werden kann. Hervorgerufen durch die perspektivische Sicht eines stationären Scanners ist der Zentriwinkel des gescannten Kreisbogens konstant. In Abhängigkeit vom horizontalen Öffnungswinkel des Laserscanners vergrößert sich beim dynamischen Verfahren der Kreisbogen und damit auch der Zentriwinkel. Ungeachtet von etwaigen Abschattungen ist demnach zu erwarten, dass die Zentriwinkel hier tendenziell größer sind als beim stationären Laserscanning. Es wird daher erwartet, dass der Zentriwinkel für gut angepasste Kreise nahe am Halbkreis liegt. Für die Berechnung des Zentriwinkels werden vom ermittelten Kreismittelpunkt aus die Richtungen zu allen Elementen der zugehörigen Punktauswahl bestimmt. Der Zentriwinkel ist die Differenz aus kleinstem und größtem Wert.

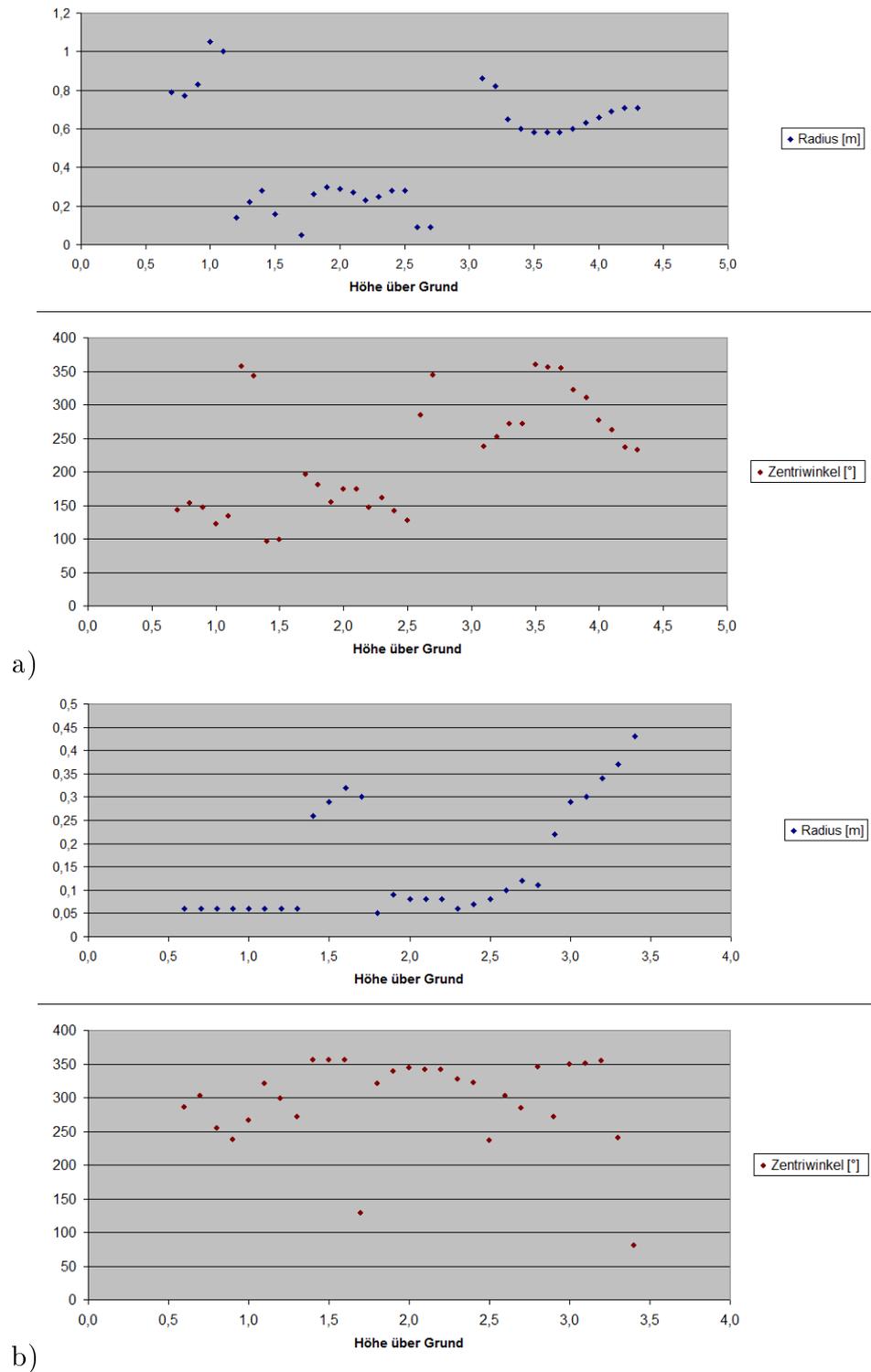


Abbildung 28: Zentriwinkelverteilung für verschiedene Bäume

Der Baum in Abbildung 28 a) hat einen Durchmesser von 30 cm. Im Bereich zwischen 1,2 m bis 2,7 m über Grund sind die Kreise am besten angepasst. Analog dazu bewegen sich die Zentriwinkel dieses Bereiches zwischen  $100^\circ$  und  $190^\circ$ . Baum

b) hat mit 13 cm Durchmesser einen schmalen Schaft. Entgegen der guten Anpassung im Bereich zwischen 0,6 m und 1,3 m liegen die Zentriwinkel bei über  $240^\circ$ . Im Gegensatz zu den Erwartungen bzw. zu dem durch die Messmethode theoretisch möglichen Wertebereich, entsprechen die Werte bei kleineren Bäumen beinahe dem Vollkreis. Diese theoretisch unmögliche Punktconstellation ist ein Indiz für eine schlechte Kreisanpassung. Beim näheren Betrachten einzelner Kreise fällt jedoch auf, dass sich diese oftmals nicht an die Punktauswahl anschmiegen. Obwohl der Wert des berechneten Durchmessers plausibel ist, liegen sie bei schmalen Baumquerschnitten ( $\text{BHD} < 0,2 \text{ m}$ ) im Inneren der Punktauswahl (siehe Abbildung 29). Grund für die Abweichung ist die hohe Punktstreuung durch die niedrige Scangeauigkeit, welche sich bei Bäumen geringen Durchmessers stärker bemerkbar macht. Die Größe des Durchmessers liegt hier in ähnlicher Größenordnung wie die durchschnittliche Punktgenauigkeit.

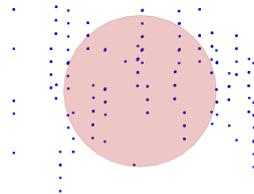
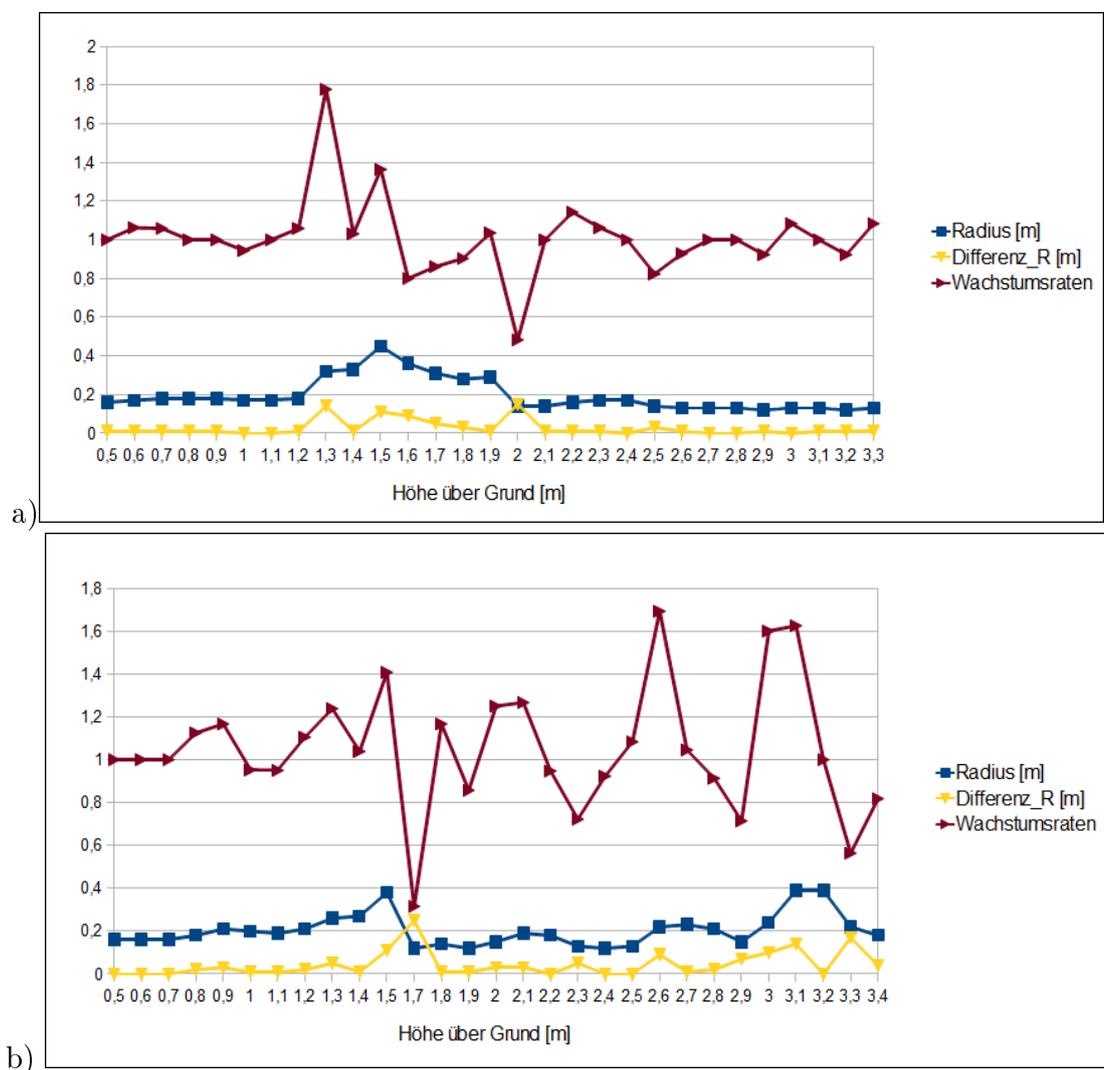


Abbildung 29: angepasster Kreis bei  $\text{BHD} = 11 \text{ cm}$

Der Zentriwinkel ist in Bezug auf die hier vorliegenden Daten ein möglicher Indikator für Bäume größerer Durchmesser ( $>30 \text{ cm}$ ). Da der Großteil der sich in der Referenzfläche befindenden Bäume nicht dicker als  $30 \text{ cm}$  ist, wird diese Herangehensweise hierfür nicht verfolgt. Sie stellt aber zukünftig bei der Nutzung hochpräziser Sensoren eine mögliche Unterstützung bei der Plausibilitätsprüfung berechneter Durchmesser dar.

**Wachstumsraten der Radien** Im Gegensatz zu den zu absoluten Unterschieden der Radien benachbarter Kreise werden bei Wachstumsraten die Unterschiede verhältnisbezogen dargestellt. Die Wachstumsraten berechnen sich wie folgt:

$$\frac{R_i}{R_{i-1}}$$



In Abbildung 30 sind für einen Baum sowohl Werte der Radius-Differenzen als auch Werte von Wachstumsraten dargestellt. Beim Betrachten der Diagramme ist

erkennbar, dass die Beträge der Radius-Differenzen einen kleineren Betrag aufweisen als die entsprechenden Werte der Wachstumsraten. Während die Werte der Radiusdifferenzen in verschiedener Ausprägung streuen, sind die Wachstumsraten skaliert. Radiussprünge werden durch die Wachstumsraten hervorgehoben und können deshalb besser detektiert werden. Dieser relative Wert ist daher ein sensiblerer Zeiger für Radiusänderungen entlang eines Stammes.

**Verschiebung der Kreismittelpunkte** Hierzu werden die Lageunterschiede zwischen benachbarten angepassten Kreisen eines Baumstammes analysiert. Es wird geprüft, welche Lage-Entfernung die Mittelpunkte zweier benachbarter Kreise haben. Ist die Differenz zu hoch, so ist der Kreisübergang nicht plausibel.

**Umsetzung** Für die Umsetzung werden die zwei Methoden zu Wachstumsraten und der Verschiebung der Kreismittelpunkte verwendet. Unter Verwendung von Wachstumsraten wird folgende Bedingung für die Änderungen des Radius entlang eines Baumstammes gestellt:

Ist der Radius zweier Kreisanpassungen gleich, so hat die Wachstumsrate den Wert 1,0. Nach dem Modell eines sich nach oben hin verjüngenden Radius sind die Wachstumsraten demnach stets kleiner 1,0. Aus diesem Grund kann der Wert 1,0 nicht als Symmetrieachse einer normalverteilten Messreihe stehen. Deshalb werden die Schwellwerte zur Filterung an Hand von Wachstumsraten nicht symmetrisch um den Wert 1,0 gelegt. Stattdessen wird ein größerer Spielraum für die Werte festgelegt, welche einem nach oben hin abnehmendem Radius entsprechen. Daher sind zwei Kreise plausibel, wenn die Wachstumsrate der beiden Radien zwischen 0,8 und 1,1 liegt.

Für die Überprüfung der Kreismittelpunkte zueinander, werden zunächst die zweidimensionalen Abstände zwischen benachbarten Kreismittelpunkten berechnet. Als Kriterium wird festgelegt, dass zwei aufeinanderfolgende Mittelpunkts-Differenzen kleiner als 10 cm sein müssen, um den Kreis als wahr anzuerkennen. Im nächsten Schritt werden beide Bedingungen kombiniert. Ein Kreis wird nur dann verwendet, wenn beide Bedingungen erfüllt sind.

Abschließend werden die gefilterten Kreisanpassungen hinsichtlich ihrer Anzahl und der Streuung jener Radius-Werte untersucht. Da die Untersuchung einer Streuung eine gewisse Anzahl an Werten voraussetzt, wird eine Mindestanzahl von drei Kreisanpassungen festgelegt. Die Standardabweichung wird als Streuungsmaß genutzt. Als Bedingung wird hier festgelegt, dass diese zwischen 0 und 10 cm liegt.

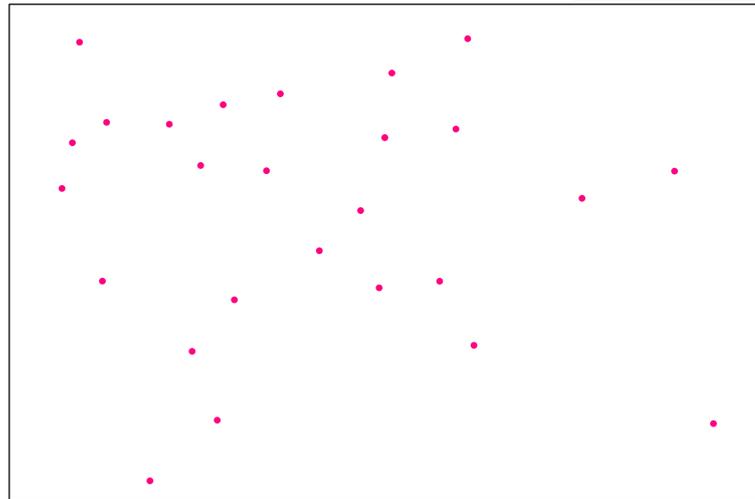


Abbildung 31: Baumdetektionen nach Filterung

### 3.8.6 Bestimmung des Brusthöhendurchmessers

Die Ermittlung des Brusthöhendurchmessers erfolgt auf Grundlage der zuvor analysierten Kreisanpassungen. Zuerst wird für jeden Satz von Kreisen geprüft, ob sich bereits ein plausibles Element auf Brusthöhe (1,3 m) befindet. Liegt in dieser Höhe kein plausibler Kreis vor, so wird aus dem bereinigten Satz von Kreisen für einen Baum ein zweidimensionales Koordinatensystem aufgespannt. Konform zu den bereits in Abschnitt 3.8.5 verwendeten Höhen/Radius-Diagrammen repräsentieren die X-Werte die relative Höhe und die Y-Werte die Radien der einzelnen Kreise. Entlang des analysierten Baumabschnitts verlaufen die Radien nur näherungsweise linear. Nach [Gadow, 2003] besteht der Baumstamm aus drei Grundkörpern. Am Stammfuß beginnend mit einem Neiloid verläuft ein Baumstamm danach in der Form eines Paraboloiden, bis er schließlich im Oberschaft in einen Kegelstumpf übergeht. Um den nicht linearen Verlauf zu beschreiben, verwendet Klemmt [2008] für seine Durchmesserschätzung von nicht gemessenen Bereichen eine natürliche Spline-Interpolation. Durch den hier vorliegenden vier Meter kurzen Analysebe-

reich und die von Ausreißern reduzierte Anzahl an Kreisanpassungen kann nicht die gesamte Formkurve des Baumschaftes ermittelt werden. Aus diesem Grund wird eine ausgleichende Gerade für diese Aufgabe als geeignet angesehen. Entsprechend der vorgestellten Höhen/Radius-Diagramme liegen als Grundlage Werte für die relative Höhe und den Radius der einzelnen Kreisanpassungen vor. Da die Höhenwerte systematisch festgelegt werden, sind ausschließlich die Werte für den Radius fehlerbehaftet. Die Geradenausgleichung wird daher durch eine lineare Regression [Bartsch, 1994, S. 561] realisiert. Aus dem Ergebnis der linearen Regression werden die Parameter der Geradenausgleichung aufgestellt. Durch Einsetzen von  $x=1,3$  (BHD-Höhe) in der Geradengleichung wird der Radius ( $y$ ) berechnet.

#### Geradenausgleichung

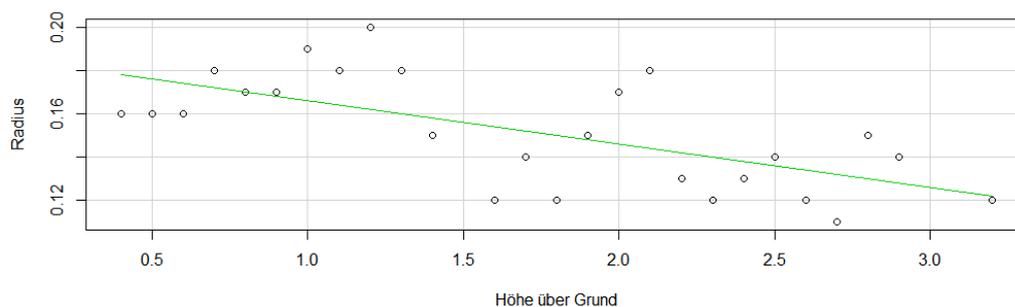


Abbildung 32: BHD-Berechnung durch ausgleichende Gerade (Einheiten in m)

**Lineare Regression**

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ 1 & x_3 \\ 1 & x_4 \\ 1 & x_n \end{bmatrix} \quad l = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_n \end{bmatrix}$$

$$N = A^T \cdot A$$

$$n = A^T \cdot l$$

$$\bar{x} = N^{-1} \cdot n$$

**Berechnung Brusthöhendurchmesser**

Aufstellung der Geradengleichung

$$y = a \cdot x + b$$

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix}$$

Radius in Brusthöhe (1,3 m)

$$r = a \cdot 1,3m + b$$

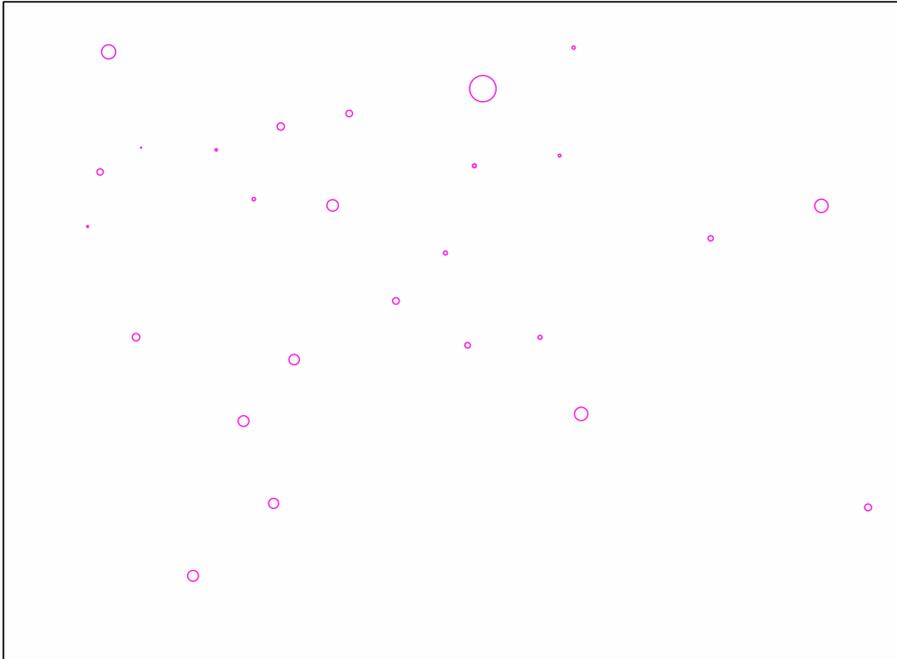


Abbildung 33: Brusthöhendurchmesser für erkannte Bäume

## 3.9 Baumhöhenbestimmung

### 3.9.1 Prüfung der Punktabdeckung im Kronenbereich

Entsprechend der Erkenntnisse von [Bienert, 2008] wird untersucht, ob durch eine mobile terrestrische Erfassung eine zufriedenstellende Punktabdeckung im oberen Kronenbereich erzielt werden kann. Da bei der Einzelbaumdetektion nicht alle Bäume innerhalb der Referenzfläche erkannt werden, erfolgt zur Validierung die Verwendung der Baumpositionen aus der Referenzmessung. Es soll herausgefunden werden, ob die mobilen terrestrischen Laserscannerdaten eine ausreichende Messpunktabdeckung ermöglichen, um eine direkte Höhenbestimmung vornehmen zu können. Konform zur Methodik in Abschnitt 3.5.2 werden die Baumhöhen über den höchsten Messpunkt innerhalb einer Voronoi-Zone für die Positionen der Referenzmessung bestimmt.

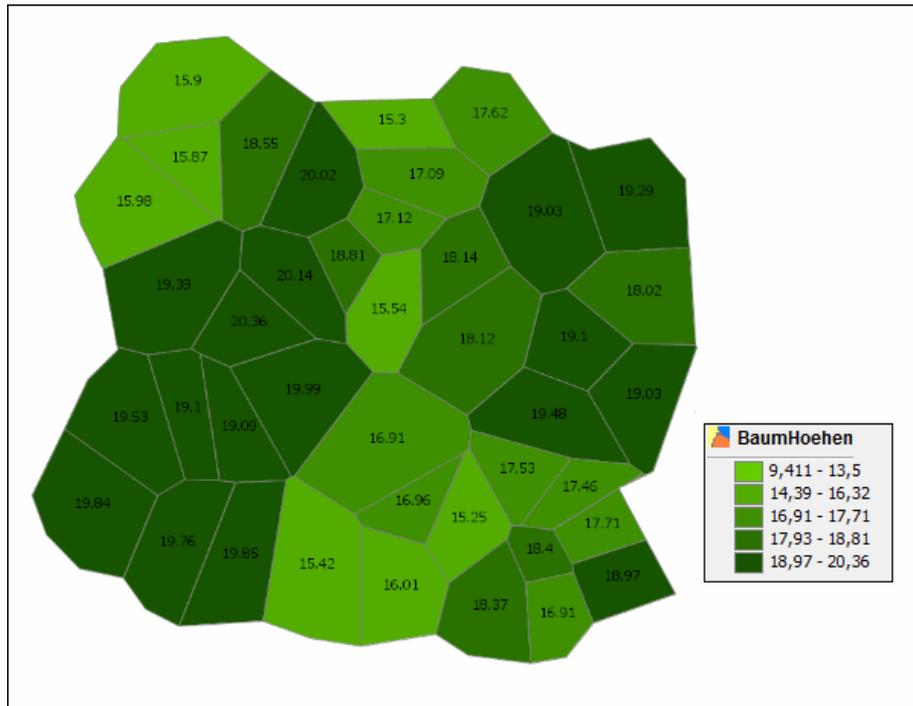


Abbildung 34: Baumhöhen der Referenzpositionen aus MLS-Daten (Einheiten in Meter)

Durch die wiederholte Verwendung der Referenzpositionen bzw. der damit verbundenen Voronio-Zonen kann ein direkter Vergleich zur Höhenbestimmung mit den luftgestützten Laserscannerdaten erfolgen.

### 3.9.2 Höhenbestimmung für erkannte Bäume

Abweichend zur zonenbasierten Herangehensweise aus 3.9.1 werden die Baumhöhen der erkannten Bäume konform zu [Bienert, 2008] auf Grundlage eines Auswahlzylinders ermittelt. Diese Methode wird verwendet, da sie im Gegensatz zu 3.9.1 ohne Einfluss von nicht erkannten Bäumen ist. Verwendet wird eine Pufferdistanz (Zylinderradius) von einem Meter um das Zentrum des erkannten Baumes. Innerhalb der entstehenden Zylinder wird der höchste Punkt gesucht, welche der Maximalhöhe des zu untersuchenden Baumes entsprechen soll (siehe Abbildung 35). Problematisch hierbei ist jedoch, dass eine eventuelle Schiefelage des Baumes dazu führt, dass sich kein Punkt der oberen Baumkrone im Inneren des Zylinders befindet.

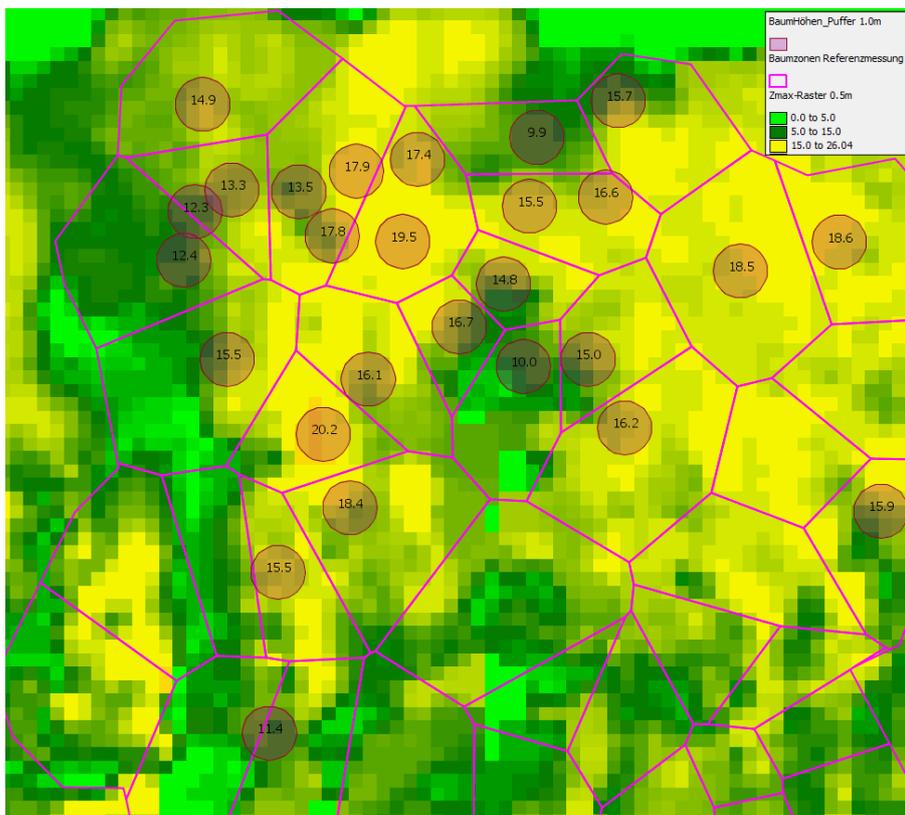


Abbildung 35: Baumhöhen für erkannte Bäume

## 4 Auswertung der Ergebnisse

Im vorigen Kapitel werden Methoden dargestellt, mit denen MLS-Daten für forstliche Zwecke ausgewertet werden können. Dabei werden in Bezug auf die jeweilige Teilaufgabe verschiedene Herangehensweisen ausprobiert und nach Güte ihres Ergebnisses bewertet. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der zur Umsetzung ausgewählten Methoden dargestellt.

### 4.1 Ergebnis der Geländeermittlung

Es wird an Hand von zwei Verfahren gezeigt wie Höhenmodelle aus mobilen terrestrischen Laserscannerdaten generiert werden können. Beide Verfahren setzen eine nachträgliche Ausreißerprüfung voraus. Mit einer Suche nach abrupten Neigungsprüngen sind diese Ausreißer detektierbar. Begrenzt durch die geringere Messpunktabdeckung in sensorfernen Bereichen wird das Gelände bis zu einem Sensorabstand von 50 m generiert. Die Auflösung des Geländemodells beträgt 3 m.

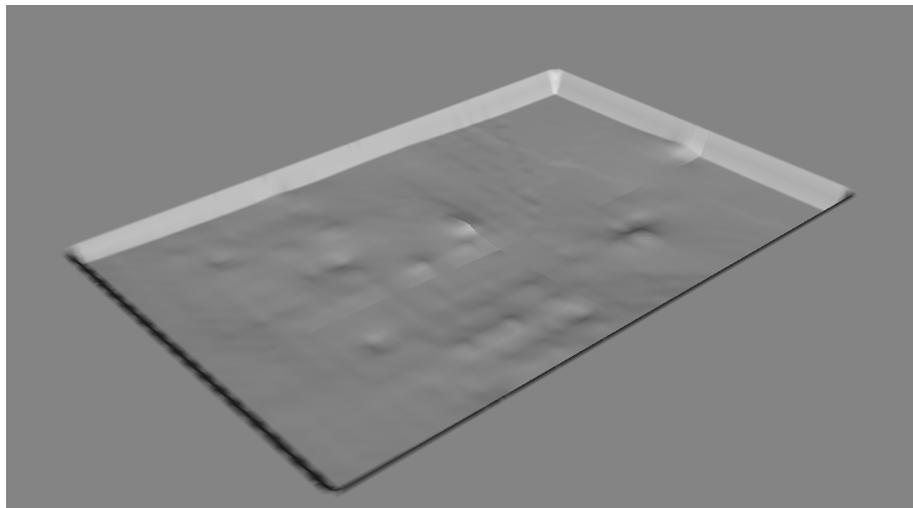


Abbildung 36: Generierte Geländeoberfläche

### 4.2 Ergebnis der Baumdetektion

Für die Umsetzung der Baumdetektion wird eine Methode vorgestellt, welche unabhängig zur Entfernung vom Sensor Bereiche mit hoher Punktdichte lokalisiert (siehe Abschnitt 3.7.1). Diese Methode liefert bis zu einer Entfernung von 30 m Detektionen an sämtlichen tatsächlichen Baumstandorten. Zusätzlich kommt es jedoch zu

mehreren Detektionen, an denen in Wirklichkeit kein Baum steht. An diesen Stellen werden hohen Punktdichten hervorgerufen durch Sträucher und dünnes Astwerk.

Die absolute Genauigkeit der detektieren Baumstandorte ist abhängig von der Auflösung des Detektionsrasters. Durch die Wahl einer Rasterweite von 50 cm wird gewährleistet, dass sich der Detektionspunkt maximal im Abstand von 50 cm zum eigentlichen Baumstandort befindet. Mit der Gruppierung der drei schichtweise durchgeführten Detektionen wird der Detektionspunkt erstmalig validiert. Hierzu erfolgt eine vereinfachte Implementierung des DBSCAN-Clusteralgorithmus. Bei größeren Abweichungen (bis 80 cm) zusammengehörender Detektionen kann es dazu führen, dass der Abstand vom Detektionspunkt zum Baumstandort größer als 50 cm wird.

### 4.3 Ergebnis der Stammanalyse

Da es sich hier um eine Datenaufnahme mit Inventur-Charakter handelt, müssen die den Baumbestand beschreibenden Parameter qualitativ hochwertig sein. Stattdessen ist die geografische Genauigkeit der Bäume zweitrangig. Aus diesem Grund liegt der Fokus bei der Genauigkeit der Durchmesserbestimmung. Die zu erwartende Genauigkeit der berechneten Durchmesser hängt neben der Form des Stammquerschnittes hauptsächlich von der Genauigkeit des Sensors ab. Während [Simonse, 2003] bei seinen Feldversuchen mit hochpräzisen Laserscannern eine mittlere Genauigkeit von etwa 2 cm erzielt, ist zu erwarten, dass die gleichen Genauigkeiten mit dem hier verwendeten Sensor nicht erreicht werden. Bei einer Winkelgenauigkeit von  $0,25^\circ$  und einem Radius (Entfernung) von 10 m, entspricht die Bogenlänge des gedachten Kreissektors 4,4 cm. Für eine Entfernung von 15 m entspricht die resultierende Bogenlänge 6,5 cm. Von vornherein muss deshalb abhängig zur Entfernung zum Sensor mit Abweichungen durch Ungenauigkeiten der Winkelmessung gerechnet werden.

#### 4.3.1 Punktauswahl und Prüfung der Detektion

Die Punktauswahl definiert sich durch alle Punkte innerhalb eines Zylinders, welcher zentriert auf einem Detektionspunkt steht. In den Versuchen werden zunächst alle Punkte des Zylinders zur Durchmesserberechnung verwendet. Dadurch haben jedoch Nicht-Stammpunkte den gleichen Einfluss auf die Berechnung wie die tatsächlichen Stammpunkte. Das hat zur Folge, dass pro Baum nur richtige Querschnittskreise entstehen, wenn in der jeweiligen Höhe keine weiteren Störpunkte vorkommen. Durch die geringe Anzahl an richtigen Kreisen können auf diese Datengrundlage keine allgemein gültigen Filtermethoden installiert werden. Aus diesem Grund wird versucht die Punktauswahl sowie einzelnen Kreisanpassungen näher zu analysieren. Hierzu werden verschiedene Verfahren getestet und deren Auswirkungen dargestellt. Vielversprechende Verfahren können teils durch die geringe Scangenaugigkeit nicht genutzt werden. Zur Umsetzung werden die Methoden ausgewählt, welche die Punktauswahl am besten bereinigen. Daher wird das Verfahren der Abschattungseffekte zur Verbesserung der Punktauswahl genutzt. Die hierzu durchgeführte Analyse des Abstandes vom Sensor, setzt eine linear referenzierte Datengrundlage voraus. Nicht linear referenzierte Punktwolken können erst nach Umformung mit dieser Methode analysiert werden.

#### 4.3.2 Vollständigkeit der Baumerkennung

Im Verlauf der Stammanalyse werden von insgesamt 41 Bäumen 23 als Baum erkannt. Das entspricht einer relativen Vollständigkeit von 56 %. Im Bereich von 15 m Entfernung zum Sensor werden von 19 Bäumen 18 als Baum erkannt. Das entspricht damit einer Vollständigkeit von 94 %. Zusätzlich werden in diesem Bereich zwei Bäume erkannt, an Stellen an denen sich nur Sträucher befinden. Zum Vergleich werden ohne die zusätzliche Filterung im sensornahen Bereich mit viel Astwerk 25 Bäume mehr erkannt, obwohl keine weiteren Bäume vorhanden sind.

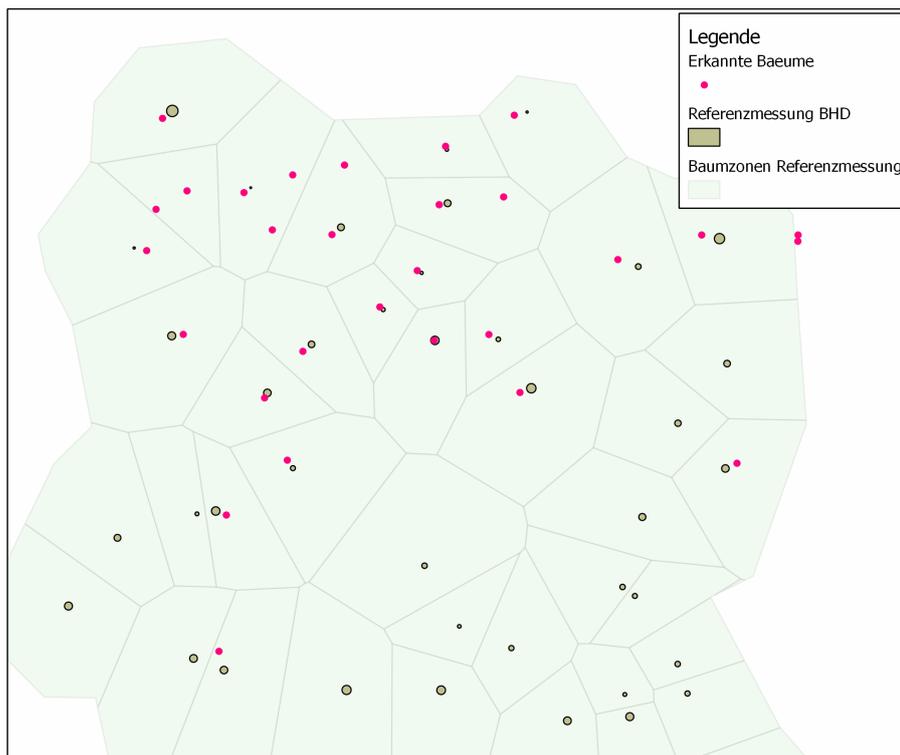


Abbildung 37: Baumdetections nach Filterung

Abbildung 37 zeigt die gleichzeitige Darstellung der gefilterten Baumdetections und der Baumpositionen aus der Referenzmessung. Bis zu einem Sensorabstand von 15 m werden alle Bäume erkannt. Lediglich im linken Teil der Abbildung werden Bäume bis zu einer Entfernung von 30 m detektiert. Zusätzlich sind Detections zu erkennen, bei denen sich tatsächlich kein Baum befindet. Dieses Phänomen entsteht hier in Bereichen mit viel Buschwerk. In entfernten Bereichen reicht die Punktabdeckung zur genaueren Baumbeschreibung nicht aus.

#### 4.3.3 Ergebnis der Kreisanzpassung

Es wird die von [Jurisch, 2009] entwickelte Methode zur Berechnung von ausgleichenden Kreisen vorgestellt. Diese Methode arbeitet auf Grundlage von Mittelwerten und ist daher bei größeren Punktmengen schneller als in der Literatur angegebene Verfahren. Während das Programm Jag3D [Lösler, 2012] für eine Punktmenge von 890 Punkten ca. 51 Sekunden benötigt, dauert das hier vorgestellte Verfahren gerade mal 15 Millisekunden. Abbildung 38 zeigt die entstehenden Kreise. Es ist zu erkennen, dass die Verfahren unterschiedlich auf die Punktstreuung reagieren

und daher unterschiedliche Durchmesser ermitteln. Der Vergleich der berechneten BHD mit der Referenzmessung wird zeigen, ob die hier verwendete Methode trotz dieser Unterschiede praktikabel ist.

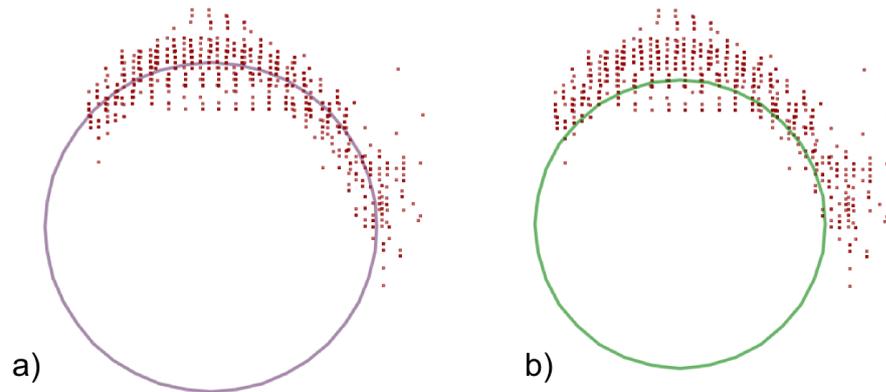


Abbildung 38: Angepasster Kreis aus 890 Punkten a) Software Jag3D b) Methode von Jurisch [2009]

In den verwendeten Daten werden meist nur lokale Bereiche entlang eines Stammes abgedeckt, wodurch eine vollständige Abbildung des Schaftes nicht möglich ist. Auf Grund dessen und der Winkelungenauigkeit entsteht eine hohe Anzahl an Fehlanpassungen bei der Kreisberechnung. Daher müssen sämtliche Kreisanpassungen auf Plausibilität geprüft werden. Hierzu werden Bedingungen für die Unterschiede der Kreismittelpunkte und die Radien benachbarter Kreise festgelegt.

#### 4.3.4 Ergebnis der Brusthöhendurchmesser-Bestimmung

Durch die Filterung der berechneten Kreisanpassungen liegen Querschnittsmessungen nicht gleichmäßig entlang des zu analysierenden Stammabschnitts vor. Trifft das ebenso für die Höhe des Brusthöhendurchmessers zu, so muss dieser geschätzt werden. Da auf die gesamte Analyse des Stammes verzichtet wird, kann der Stammverlauf innerhalb des vier Meter hohen Stammabschnitts näherungsweise durch eine Gerade beschrieben werden.

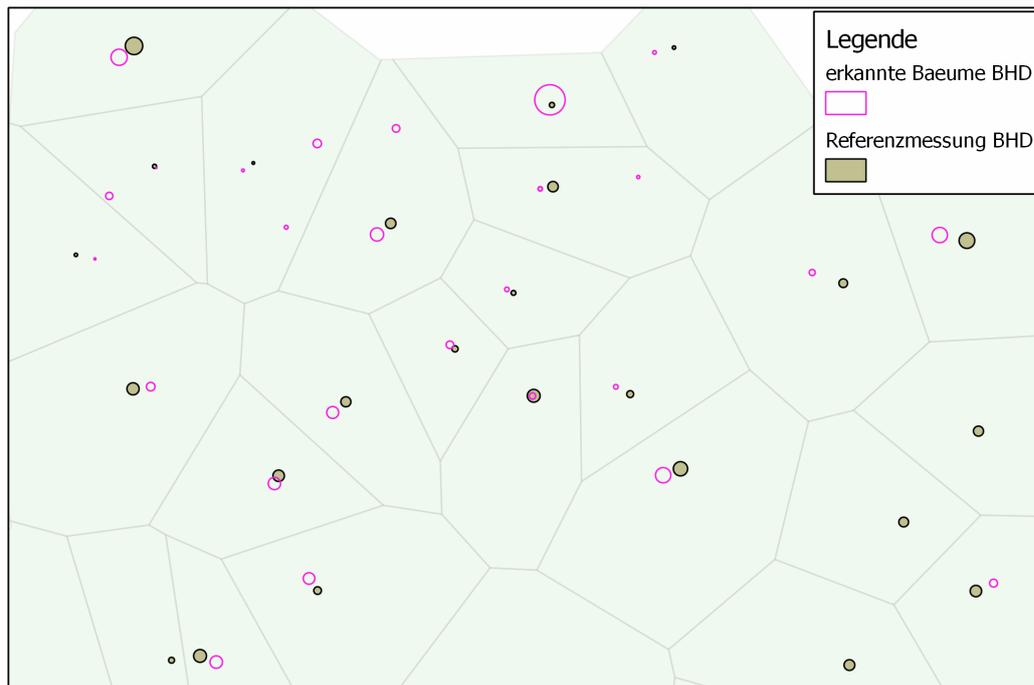


Abbildung 39: Berechnete BHD für erkannte Bäume

Abbildung 39 zeigt die gleichzeitige Darstellung der berechneten BHD und der BHD aus der Referenzmessung. Die berechneten Durchmesser entsprechen weitestgehend denen der Referenzmessung. Der große Kreis im oberen Teil der Karte wird hervorgerufen durch einen Baum mit bodennahem Zwiesel (schwarzer Baum in Abbildung 40). Betrachtet man den Bereich hinter diesem Baum, so stehen drei Bäume etwa rechtwinklig zur Fahrachse in einer Linie. Bei zwei der drei Bäume ist die Abweichung der Durchmesser größer als der durchschnittliche Fehler von 10 cm. In Abbildung 40 wird dargestellt, wie sich Abschattungen bei hintereinander stehenden Bäumen auswirken. So ist im Scan-Bild vom hinteren Baum (grün) kaum etwas zu sehen. Dennoch ist im  $x/z$ -Streudiagramm der zugehörigen Punktauswahl eine größere Punktmenge zu sehen. Diese Tatsache wird ermöglicht durch den horizontalen Öffnungswinkel des Sensors. Ohne diesen wären für den vierten Baum kaum Punkte zu erwarten. Der Durchmesser des Baumes kann jedoch nicht näherungsweise berechnet werden, da trotzdem Messschatten entlang des Baumstammes verlaufen und die verbleibenden Punkthaufen im  $x/z$ -Streudiagramm in mehrere Stücke teilen.

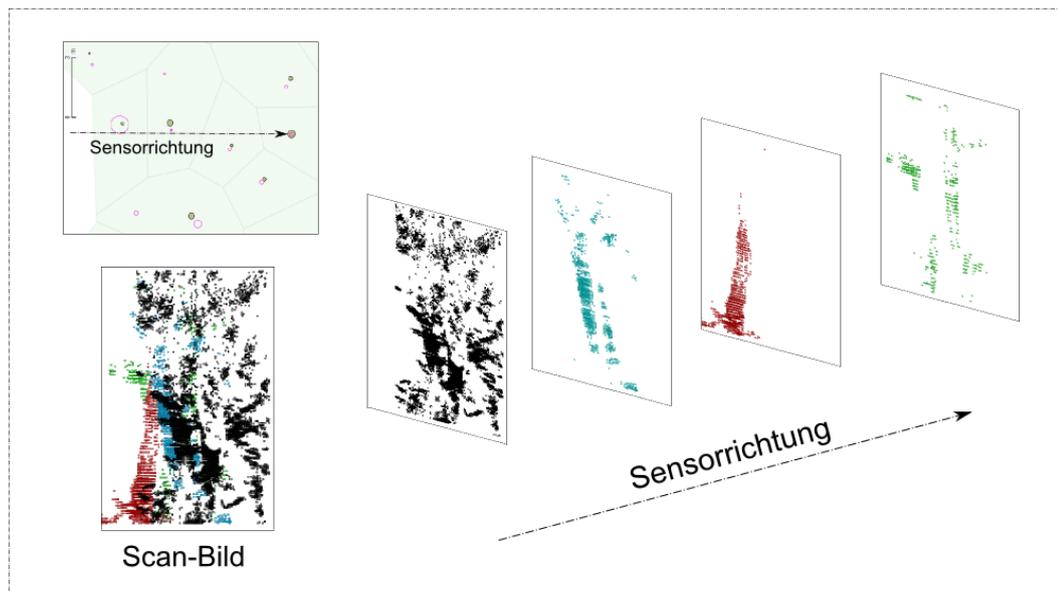


Abbildung 40: Abschattung hintereinander stehender Bäume

Nimmt man die durch Zwiesel und Abschattung betroffenen Bäume aus der Statistik (Abbildung 40), so beträgt die mittlere Abweichung der BHD bis zu einem Abstand von 15 m vom Sensor 4 cm. Damit entspricht diese Genauigkeit des an Hand der Winkelgenauigkeit des Sensors prophezeiten durchschnittlichen Fehlers. Gleichzeitig wird dadurch auch die verwendete Methode der Kreisanpassung für anwendbar angesehen.

## 4.4 Ergebnis der Baumhöhenbestimmung

### 4.4.1 Punktabdeckung

In verschiedenen Arbeiten wird bereits aufgezeigt, dass durch stationäres Laser-scanning eine unzureichende Punktabdeckung im Kronendach erzielt wird. Entsprechend der Erkenntnisse von [Bienert, 2008] wird hier untersucht, ob durch MLS eine ausreichende Punktabdeckung erzielt werden kann. Dazu werden mit Kenntnis der tatsächlichen Baumstandorte Zonen für jeden Baum generiert. Zur Ermittlung der Baumhöhe wird die Geländehöhe am Baumfuß von der Höhe des höchsten Punktes innerhalb der Baumzone subtrahiert. Die daraus resultierenden Größen werden verglichen mit den aus ALS-Daten generierten Baumhöhen.

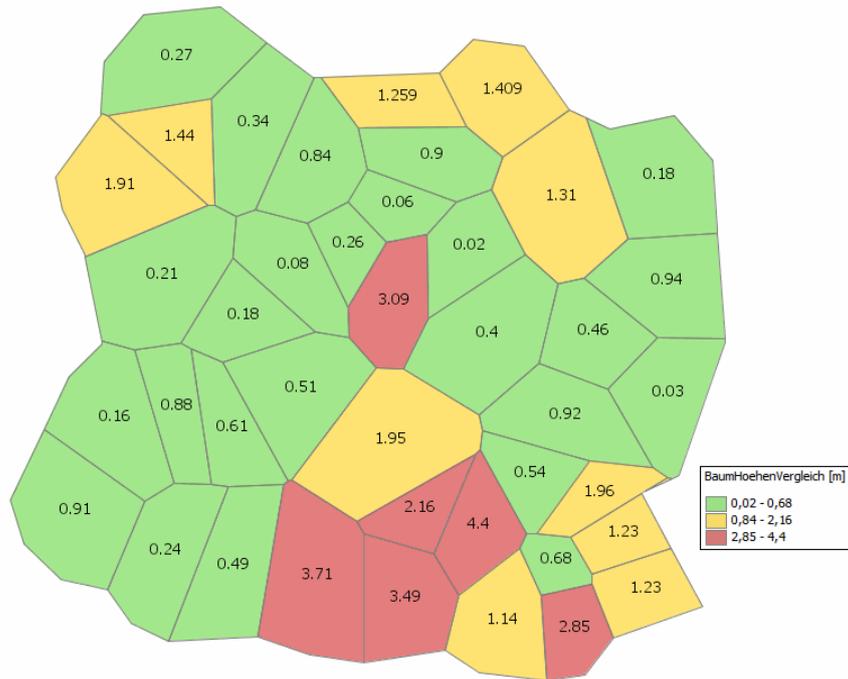


Abbildung 41: Differenz der Baumhöhenbestimmung zwischen ALS-Daten zu MLS-Daten

An Hand der 41 verglichenen Bäume liegt in den Differenzen zwischen ALS- und MLS-Daten eine Standardabweichung von 1,1 m vor. Im Bereich von einer maximalen Sensorentfernung von 25 m beträgt die Standardabweichung nur 0,73 m. Nimmt man zum Vergleich die von [Prodan, 1965] festgestellte Genauigkeit eines Baumhöhenmessers an, so würde diese bei einem durchschnittlichen Fehler von 5 % für die Bäume bis zu einem Abstand von 25 m bei 0,93 m liegen. Für alle 41 Bäume des Versuchsfeldes entspricht das einer durchschnittlichen Abweichung von 0,95 m. Im Bereich von einer Entfernung von maximal 25 m wird damit die zu erwartende Genauigkeit eines Baumhöhenmessers übertroffen. Demnach liegt in diesem Bereich theoretisch eine ausreichende Punktabdeckung im Kronendach vor, um Baumhöhen direkt aus MLS-Daten zu bestimmen. Je weiter Bäume vom Sensor entfernt sind, desto weniger Signale können bis zum Kronendach vordringen.

#### 4.4.2 Höhenbestimmung der Einzelbäume

Nach der Überprüfung der Punktabdeckung durch den Vergleich mit den ALS-Daten wird nun das Ergebnis der Höhenauswertung der erkannten Baumstandorte aufgeführt. Um den Einfluss nicht erkannter Bäume bei der Höhenauswertung zu vermeiden, werden hierfür keine Zonen wie im Abschnitt 4.4.1 generiert. Der stattdessen verwendete Ansatz basiert auf Puffern, welche um das Zentrum des erkannten Baumstandortes verlaufen.

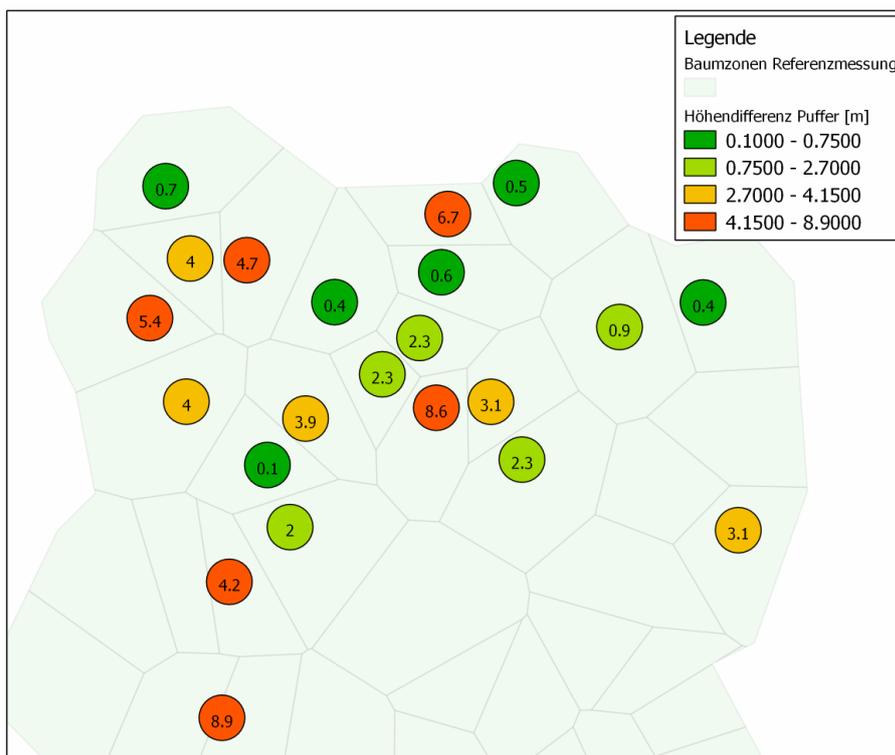


Abbildung 42: Differenzen der äquivalenten Baumhöhen

Abbildung 42 zeigt die Darstellung der Höhenberechnung für die Pufferflächen der erkannten Baumstandorte. Die Puffer sind in Abhängigkeit des Betrages der Höhenabweichung eingefärbt. Die orange und rot eingefärbten Pufferflächen werden als Ausreißer angesehen. Die bestimmten Baumhöhen haben eine mittlere Abweichung von 3,0 m zu den Referenzdaten der ALS-Aufnahme. Dem gegenüber erzielt [Bienert, 2008] mit der gleichen Methodik im Single-Scan-Modus eine mittlere Höhengenaugigkeit der Baumhöhen von 3,30 m und 1,47 m. Ihre mittlere Höhengenaugigkeit beim Multiple-Scan liegt stattdessen bei 0,9 m. Da an Hand der Grafik keine Entfernungs-Abhängigkeit zu erkennen ist, wird abgeleitet, dass bei dieser Methode

nicht die Entfernung zum Sensor die hohen Abweichungen hervorruft. Stattdessen ist davon auszugehen, dass sich durch Schrägstand der Bäume das Zentrum des Kronendaches nicht innerhalb der Pufferflächen befindet. Würde man als Gegenmaßnahme die Pufferdistanz vergrößern, würde sich auch die Wahrscheinlichkeit der sich überlappenden Baumkronen erhöhen.

## 4.5 Vergleich des mobilen zum stationären terrestrischen Laserscanning

### 4.5.1 Vorteile

- höhere Messpunkt-Abdeckung (horizontal und vertikal)
- schnelle Durchführbarkeit
- Registrierung der Punktwolke erfolgt automatisch

### 4.5.2 Nachteile

- hohes Datenaufkommen
- geringere Genauigkeit durch Fahrtbewegung und Erschütterung während der Messung
- kontinuierliche Satelliten-Positionierung ist durch Abschattung der Baumkronen nicht gewährleistet
- Methodik setzt Befahrbarkeit in Abhängigkeit des Messbereiches voraus

## 4.6 Vergleich des mobilen terrestrischen zum luftgestützten Laserscanning

### 4.6.1 Vorteile

- höhere Punktauflösungen und höherer Detailgrad durch kürzere Messentfernungen
- kurzfristige Durchführbarkeit, da keine Fluggenehmigung vorliegen muss

### 4.6.2 Nachteile

- geringere Flächenleistung
- Realisierung von flächendeckender Erfassung ist abhängig von Befahrbarkeit
- kontinuierliche Satelliten-Positionierung ist durch Abschattung der Baumkronen nicht gewährleistet
- Baumhöhenfassung nur für unbelaubte Bäume realistisch

## 4.7 Ausblick

Mobiles terrestrisches Laserscanning kann in der Forstwirtschaft unterstützend für detailliertere Inventuren genutzt werden. Erfassbare Bereiche werden in kurzer Zeit gescannt und können automatisch ausgewertet werden. Die dabei entstehenden Ergebnisse sind wichtige Informationen für die Forstwirtschaft. Die Ermittlung sekundärer Bestandeskenngrößen kann somit aus echten Informationen und nicht durch Hochrechnung von Stichproben erfolgen. Unter Nutzung von Scannern niedriger Genauigkeit liefern die hier vorgestellten Methoden im unbelaubten Laubwald verwendbare Inventurgrößen bis 15 m Entfernung. In darauf folgenden Arbeiten liegt der Bedarf der Forschung in der Anwendung und Verbesserung der Methoden unter Verwendung hochpräziser Sensorsysteme. Es ist zu erwarten, dass die vorgeschlagenen Methoden im Zusammenhang mit hochauflösenden MLS-Daten bessere Ergebnisse erzielen. Zusätzlich bietet die Information über die Intensität (Reflektanz) der Signale ein Potential zur Klassifikation einzelner Bestandteile von Punktwolken. Genauso könnten für streuungsarme Punktwolken auch Algorithmen Verwendung finden, welche Punkte an Hand ihrer Normalvektoren analysieren.

Die Nutzung von MLS-Systemen in forstwirtschaftlichen Flächen erfordert momentan noch Entwicklungsarbeit für die permanente Positionierung des Messfahrzeuges. Systeme zur permanenten Ermittlung von Positionsänderungen (z. B. Inertialsysteme) benötigen in gewissen Abständen Stützsignale, um eine Grundgenauigkeit zu gewährleisten. Die dafür übliche satellitengestützte Positionsbestimmung kann jedoch im Wald nur bedingt hochgenaue Standortdaten liefern. Durch diesbezügliche Anpassung der Technik an die Verhältnisse im Wald könnten Baumbestände in kurzer Zeit erfasst werden. Das könnte zum einen für einen Ausschnitt des Bestandes geschehen. Zum anderen ist auch eine flächendeckende Erfassung von Geländefahrzeugen oder Forstmaschinen denkbar. Neben explizit durchgeführten Inventuren können diese Informationen daher auch während Durchforstungsmaßnahmen durchgeführt werden. Hinsichtlich Implementierung und Auswertegeschwindigkeit muss geprüft werden, ob sich Echtzeit-Verfahren besser eignen als die Auswertung im Post-Prozess.

Durch diese Methodik würden Inventuren nicht mehr stichprobenhaft geschätzt, sondern abhängig von der Befahrbarkeit, Messreichweite und Bestandsdichte nahezu flächendeckend erfasst werden.

## 5 Zusammenfassung

In dieser Masterthesis werden Methoden untersucht, welche auf Grundlage von Daten mobiler terrestrischer Laserscanner Forstinventur-relevante Parameter bestimmen. In der Vergangenheit wurden bereits Arbeiten zur Auswertung von stationären Laserscannern veröffentlicht. Die dabei entstandenen Methoden werden in dieser Arbeit in Bezug auf das mobile Erfassungsprinzip getestet und modifiziert. Die damit verbundene Auswertung ist mehrschichtig und besteht aus vier Teilaufgaben. Diese sind die Generierung eines Höhenmodells, die Detektion der Baumstandorte, die Analyse des Stammes und die Baumhöhenbestimmung. Als Versuchsfeld wird ein Laubmischbestand ausgewählt, der zum einen durch einen ausgebauten Weg erschlossen ist. Zum anderen zeichnet sich dieser mit unterschiedlichen Baumdurchmessern und Baumhöhen aus, wodurch die Ergebnisse der Analyseverfahren repräsentativ sind. Der durchgeführte Messvorgang wurde außerhalb des Belaubungszustandes vom Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) durchgeführt. Der dabei genutzte Sensor ist ein ALASCA XT der Firma Ibeo. Zur Validierung der Methoden erfolgte eine Referenzmessung mit Tachymeter Leica TPS 700 und Kluppe. Die vom ATB erhaltenen linear referenzierten Punktdaten werden in eine Datenbank überführt. Hierzu kam die objektrelationale Open-Source-Datenbanksoftware PostgreSQL in Verbindung mit PostGIS zum Einsatz. Unabhängig von der Zugriffsgeschwindigkeit wird durch die Datenbank eine für die Versuchszwecke robuste Schnittstelle zu den Daten ermöglicht. Im ersten Schritt der Auswertung erfolgt die Generierung des Höhenmodells, welches eine wichtige Information für alle folgenden Schritte darstellt. Hierzu werden zwei Methoden analysiert, welche jedoch beide nicht robust bezüglich Ausreißern sind. Über eine spezielle Filterung werden diese Ausreißer detektiert. Die Detektion der Baumstandorte erfolgt durch Analyse der vertikalen Punktdichte. Hierzu wird ein Verfahren vorgestellt, welches unabhängig von der Entfernung zum Sensor ist. Durch störende Einflüsse wie Sträucher und Astwerk entstehen bei der Baumdetektion mehr potentielle Baumstandorte als es tatsächliche Bäume gibt. Bevor also der Stamm analysiert werden kann, muss die dafür benötigte Punktauswahl untersucht werden. Für diese Aufgabe wird ein Verfahren entwickelt, welches speziell das Prinzip eines

vorbeifahrenden Sensors widerspiegelt. Genauer wird dabei der Abschattungseffekt eines Baumes genutzt, durch den unmittelbar hinter jedem Baum kein weiteres Objekt in der Punktwolke zu erwarten ist. Mit diesem Verfahren ist es möglich Störpunkte weitestgehend zu erkennen. Bei der Stammanalyse erfolgt in unterschiedlichen Höhen eine Kreisanpassung. Hierzu wird ein Verfahren vorgestellt, welches bei größeren Punktmengen schneller zum bestangepassten Kreis führt. Die Verfahren für die Durchmesserbestimmung zeigen jedoch Schwächen bei Bäumen mit niedrigem Zwiesel. Im Zuge der Baumhöhenmessung bestand die Möglichkeit eines Vergleiches der mobil terrestrisch erfassten Daten mit Daten einer luftgestützten Laserscanner-Befliegung. Dabei konnte festgestellt werden, dass auf Grundlage von Baumzonen bis zu einem Abstand von 30 m zum Sensor nahezu gleiche Ergebnisse für Baumhöhen erreicht werden konnten. Es wird gezeigt, dass generell durch die mobile Erfassungsmethode eine ausreichende Erfassung der Baumkronen möglich ist, welche später zur direkten Baumhöhenbestimmung genutzt werden kann. Bei der Höhenbestimmung von den einzelnen erkannten Bäumen konnte nicht das gleiche Ergebnis wie bei der zonenbasierten Höhenbestimmung erreicht werden. Die hierzu genutzten Pufferflächen sind gegenüber den Zonen zu klein und beinhalten durch Schrägstand der Bäume oftmals nicht den höchsten Punkt des jeweiligen Kronendaches. Zusammenfassend konnten die wichtigen Primärkenngrößen für den sensornahen Teil des vorliegenden Bestandes bestimmt werden. Da es sich bei dem vorgestellten Thema um eine spezielle Anwendung von Laserscanner-Daten handelt, konnte im Rahmen der Versuche nicht auf Standardsoftware zurückgegriffen werden. Stattdessen mussten für die Versuche stets Methoden implementiert werden. Aus diesem Grund entstand hoher Programmieraufwand für die einzelnen Testszenarios. Der datenbankbasierte Datenzugriff ist für die in der Praxis durchzuführenden Auswertungen von Punktwolken zu langsam. Hier muss stattdessen mit dateibasiertem Zugriff oder über eine Echtzeit-Auswertung gearbeitet werden, um eine wirtschaftliche Prozessierung zu gewährleisten.

## Literatur

- Cmatlib bilbliothek für lineare algebra. URL <http://dwsim.hg.sourceforge.net/hgweb/dwsim/dwsim/diff/bd6de5d886a3/DWSIM/Classes/Math/cMatLib.vb>. Abrufdatum 13.12.2012.
- Npgsql - .net data provider for postgresql. The Npgsql Development Team. URL <http://npgsql.projects.pgfoundry.org/>. Abrufdatum 13.12.2012.
- Sharpmap - geospatial application framework for the clr. URL <http://sharpmap.codeplex.com/>. Abrufdatum: 13.12.2012.
- Aufnahmeanweisung für die dritte bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Mai 2011.
- Thies M.-Spiecker-H. Aschoff, T. Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. 2004a.
- Thies M.-Winterhalder-D.-Kretschmar U. Spiecker H. Aschoff, T. Automatische ableitung von forstlichen inventurparametern aus terrestrischen laserscannerdaten. *24. Wissenschaftliche Jahrestagung der DGPF*, pages 341–348, 2004b.
- H.J. Bartsch. *Taschenbuch mathematischer Formeln*, volume 16. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig-Köln, 1994.
- Scheller S. Bienert, A. Verfahren zur automatischen bestimmung von forstinventurparametern aus terrestrischen laserscannerpunktvolken. *DGPF Tagungsband*, 17/2008, 2008.
- Scheller S.-Keane-E.-Mullooly G. Mohan F. Bienert, A. Automatische erfassung forstinventur-relevanter geometrieparameter von waldbäumen aus terrestrischen laserscannerdaten. 2007.
- Hopkinson C.-Treitz-P. Chasmer, L. Assessing the three-dimensional frequency distribution of airborne und ground-based lidar laser scanning data for red pine and mixed deciduous forest plots. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXVI - 8/W2:66–70, 2004.

- N. de Lange. *Geoinformatik in Theorie und Praxis*, volume 2. Springer-Verlag, Berlin und Heidelberg, 2006.
- E. Drixler. *Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum*. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 1993.
- Kriegel H.-P.-Sander-J. Xu X. Ester, M. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *KDD*, pages 226–231, 1996.
- K. Gadow. *Waldstruktur und Wachstum*. Universitätsverlag Göttingen, 2003.
- K. Gadow. *Forsteinrichtung*. Universitätsverlag Göttingen, 2005.
- Chasmer L.-Young-Pow-C. Treitz P. Hopkinson, C. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. 2003.
- R. Jurisch. Berechnung eines ausgleichenden kreises (unveröffentlichtes manuskript). Institut für Vermessung und Geoinformation, Hochschule Anhalt Dessau-Roßlau, 2009.
- B. D. Kamphaus. Lidar data analysis software. *GeoInfomatics*, 1:18–19, 2012.
- Brolly G. Kiraly, G. Tree height estimation methods for terrestrial laser scanning in a forest reserve. *ISPRS Workshop on Laser Scanning - Silvilaser 2007*, pages 211–215, 2007a.
- Brolly G.-Márkus-I. Kiraly, G. Application of terrestrial laser scanning for investigation on single trees. *Bulletins of Geomatics*, X:241–250, 2007b.
- Tauber R. Klemmt, H. Automatisierte ermittlung forstinventurrelevanter parameter aus 3d-laserscanning-daten sowie aus 2d dendroscandaten - eine vergleichende feldstudie. *DVFFA - Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2008*, pages 169–179, 2008.
- Akca A. Kramer, H. *Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur*. Sauerländer, 1982.
- K. Kraus. *Photogrammetrie Band 1*, volume 7. Auflage. Walter de Gruyter, 2004.

- Bärschmann A.-Banfi-D.-Ertac Ö. Kunert M. Moraru D. Schäffler U. Wagenhäuser M. Wanasky S. Kutzner, T. Gis 2010: Die trends im Überblick. *GIS. BUSINESS*, 8:8–13, 2010.
- Vandapel-N.-Herbert-M. Lalonde, J.-F. Automatic three-dimensional point cloud processing for forest inventory. *Robotics Institute Paper 334*, 2006.
- M. Lösler. Jag3d. <http://derletztekick.com/software/formanalyse>, 2012. Abrufdatum 13.12.2012.
- Martin R.-Marshall-D. Lucacs, G. Faithful least-squares fitting of spheres, cylinders and tori for reliable segmentation. 1998.
- J. Nagel. Skript waldmesslehre, 2001.
- Gorte B.-Winterhalder-D. Pfeifer, N. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. 2004.
- I. Pál. Numerische und digital-geometrische methoden für die automatische bestimmung von forstrelevanten größen aus 3d-laserscanning-daten. *DVFFA - Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2007*, pages 68–76, 2007.
- M. Prodan. *Holzmesslehre*. J.D. Sauerländer, 1965.
- Riedel. *Terrestrisches Laserscanning - TLS 2010 mit TLS Challenge*. Wißner Verlag, 2010.
- Schmidt A.-Maas-H.-G. Schilling, A. Automatic tree detection and diameter estimation in terrestrial laser scanner point clouds. *Computer Vision Workshop*, 16, 2011.
- Willhoeft V.-Schulz-R.-Kluge T. Scholz, J. *ALASCA User Manual*. Ibeo Automobile Sensor GmbH, 22179 Hamburg, Fahrenkrön 125, Germany, 02 2006.
- Aschoff T.-Spiecker-H.-Thies M. Simonse, M. Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laserscanning. *Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*. Umeå, Sweden, pages 252–258, 2003.

- H. Späth. Ausgleich mit einem kreis im raum. *AVN*, 11-12:398–399, 2000.
- Aschoff T. Spiecker-H. Thies, M. Terrestrische laserscanner im forst. *AFZ-DerWald*, 22:1126–1129, 2003.
- H. Thies, M. und Spiecker. Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. *Proceedings of the ISPRS working group Laser-Scanners for Forest and Assessment*, XXXVI - 8/W2:192–107, 2004.
- Institut für Waldwachstum Uni Freiburg. Natscan - laserscannersysteme für landschaftsinventuren, 2004. URL <http://www.natscan.uni-freiburg.de>. Abrufdatum 13.12.2012.
- Koch R. Bobey-K.-Bombosch F. Ziegler, A. Echtzeit und embedded - algorithmen und sensorsystem für die dynamische waldinventur. In Luhmann/Müller (Hrsg.), editor, *Photogrammetrie, Laserscannung, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2010*, pages 142–153. Wichmann, 2010.

## Anhang

Im Rahmen der Implementierungen werden die Software-Bibliotheken Npg, Sha, CMA eingebunden:

### Bereinigung Zmin-Gelände

```

Public Sub analyzeZminRaster(ByRef tableName As String, ByRef rasters As ArrayList)
  Dim werteliste As New Dictionary(Of String, Box)
  Dim maxAbstand As Double=0
  Dim maxStation As Double=-9999999
  Dim minStation As Double=9999999
  For Each raster As Object In rasters
    If Math.Abs(raster.abstand)>Math.Abs(maxAbstand) Then
      maxAbstand=raster.abstand
    End If
    If raster.station<minStation Then
      minStation=raster.station
    End If
    If raster.station>maxStation Then
      maxStation=raster.station
    End If
    Dim curBox As new Box(raster.boxNr, raster.station, raster.abstand, raster.zmin)
    'Schlüssel wird genriert
    Dim key As String
      key=Math.Round(station,1).ToString & "_" & Math.Round(abstand,1).ToString
    'Box wird hinzugefügt
    werteliste.Add(key, curBox)
  Next
  Dim tempBox As Box
  Dim aktStat, aktAbst As Double
  'Durchlaufe alle Stationen
  For i As Double=minStation To maxStation Step 3
    'Vorgänger-Box
    Dim preBox As Box
    'Durchlaufe alle Zellen für diese Station
    For j As Double=-1.5 To maxAbstand Step -3
      'Wert am nächsten zur Fahrachse wird angenommen
      If j=-1.5 Then
        Dim preKey As String =i.ToString & "_" & "-1,5"
        If werteliste.ContainsKey(preKey) Then
          tempBox=werteliste.Item(preKey)
        End If
      Else
        'Vorgängers entspricht letzter aktueller Box
        preBox=tempBox
        tempBox=Nothing
      End If
    Next
  Next

```

```

Dim tempkey As String =i.ToString & "_" & j.ToString
If werteliste.ContainsKey(tempkey) Then
    tempBox=werteliste.Item(tempKey)
    'Höhenunterschied zwischen aktuelle Zelle und Vorgänger
    Dim deltaH As Double=Math.Round(tempBox.zMin-preBox.zMin,1)
    'Ist der Höhenunterschied zum Vorgänger größer als 50 cm
    If Math.Abs(deltaH)<0.5 Then
        tempBox.isUsed=True
    Else
        'Setze gleiche Höhe wie Vorgänger
        'übernächste Boxen können stimmen
        tempBox.zMin=preBox.zMin
        tempBox.isUsed=False
    End If
End If
End If
Next
Next
End Sub

```

## DBSCAN - Clusteralgorithmus

```

Public Function DBSCAN(ByRef points() As Punkt, ByVal eps As Double,
    ByVal MinPts As Integer) As ArrayList '(Of Cluster)

    'Liste aller Cluster Dim clusters As New ArrayList '(Of Cluster)
    Dim pointColl As New SharpMap.Geometries.GeometryCollection

    'Durchlaufe jeden Punkt der Punktliste
For Each pkt As Punkt In points
    Try
        Dim foundClust As Boolean=False
        'wurde schon ein Cluster erstellt?
        If clusters.Count>0 Then
            Dim i As Integer=0
            Dim indexFoundedCluster=-1
            Dim removeItems As New ArrayList
            For Each curCluster In clusters
                Try
                    'liegt der Punkt innerhalb des Clusters
                    If curCluster.Contains(pkt) Then

                        'ist dieser Punkt bereits einem Cluster zugewiesen?
                        If foundClust=True Then

                            'vereinige Cluster
                            clusters.Item(indexFoundedCluster).addCluster(curCluster)

                            'Cluster entfällt
                            removeItems.Add(i)
                        Else
                            'es wurde ein zugehöriges Cluster gefunden
                            foundClust=True

                            'muss die konvexe Hülle vergrößert werden?
                            Dim isInnerhalb As Boolean
                            isInnerhalb=sharpPoint.Within(curCluster.convexHull)
                            curCluster.add(pkt, isInnerhalb)
                            indexFoundedCluster=i
                        End If
                    End If
                    i=i+1
                Catch ex As Exception
                    Console.WriteLine("Cluster_nicht_lesbar")
                End Try
            Next
        Try

```

```

        'lösche entfallene Cluster
For Each index As Integer In removeItems
        clusters.RemoveAt(index)
Next

        'Wurde noch kein Cluster angelegt, dann füge diesen einem neuen Cluster zu
Else If clusters.Count=0 OR foundClust=False Then
        Dim clust As New Cluster(eps)
        clust.add(pkt, False)
        clusters.Add(clust)
End If
    Catch ex2 As Exception
        Console.WriteLine("DBSCAN_ abgebrochen")
    End Try
Next
    return clusters
End Function

```

## DBSCAN Cluster vereinfacht

```

Public Class Cluster
  Public points As GeometryCollection
  Public convexHull As Geometry
  Public convexHullBuffer As Geometry
  Public count As Integer=0
  Public epsilon As Double

  'initialisiert eine neue Instanz für ein Cluster
  'Epsilon ist der maximale Abstand zwischen Punkten eines Clusters
  Public Sub New(ByVal epsilon As Double)
    points = New GeometryCollection
    Me.epsilon=epsilon
  End Sub

  'cluster wird um Punkt erweitert
  Public Sub add(ByRef point As Punkt, ByVal isInnerhalb As Boolean)
    Dim sharpPoint As new Point3d(point.x, point.y, point.z)
    points.Collection.Add(sharpPoint)
    count=points.Collection.Count
    If isInnerhalb = false Then
      berechneConvexHull()
    End If
  End Sub

  'Cluster werden vereinigt
  Public Sub addCluster(ByRef clust As Cluster)
    Dim isBigger As Boolean=false
    For Each geom As Geometry In clust.points
      If geom.Dimension=1 Then
        Dim sharpPoint As Point3D
        sharpPoint=DirectCast(geom, Point3D)
        points.Collection.Add(sharpPoint)
        count=points.Collection.Count
        If isBigger=false AND sharpPoint.Within(ConvexHull) =False Then
          isBigger=true
        End If
      End If
    Next
    If isBigger=True Then
      berechneConvexHull()
    End If
  End Sub

  'Methode ermittelt die Konvexe Hülle des Clusters
  Private Sub berechneConvexHull()
    Try

```

```

If points.Collection.Count=1 Then
    Dim point As Point
    point=DirectCast(points.Collection.Item(0),Point)
    'es wird einen kleine Fläche durch einen Puffer erzeugt,
    'um die eine Konvexe Hülle für den Punkt zu simulieren
    convexHull=point.Buffer(0.0001)
Else
    If points.Collection.Count=2 Then
        'es wird einen kleine Fläche durch einen Puffer erzeugt,
        'um die eine Konvexe Hülle für den Punkt zu simulieren
        Dim point1 As Point
        point1=DirectCast(points.Collection.Item(0),Point)
        Dim point2 As Point
        point2=DirectCast(points.Collection.Item(1),Point)
        Dim linePoints(1) As Point
        linePoints(0)=new Point(point1.x,point1.y)
        linePoints(1)=new Point(point2.x,point2.y)
        Dim tempLine As New LineString(linePoints)
        convexHull=tempLine.Buffer(0.0001)
    Else
        'Cluster hat mehr als 3 Punkte
        convexHull=points.ConvexHull
    End If
End If

    'Konvexe Hülle wird um den Betrag von epsilon vergrößert
    convexHullBuffer=convexHull.Buffer(epsilon)
    Catch ex As Exception
        Console.WriteLine("Konvexe_Hülle_konnte_nicht_berechnet_werden")
    End Try
End Sub

    'Funktion Überprüft, ob sich ein Punkt innerhalb der Cluster befindet.
    'Genauer wird überprüft,
    'ob er in der Bufferfläche der Konvexen Hülle liegt
    Public Function contains(ByRef pkt As Punkt) As Boolean
        Dim sharpPoint As New Point(pkt.x,pkt.y)
        Dim bool As Boolean=False
        Try
            bool=sharpPoint.Within(Me.convexHullBuffer)
        Catch ex As Exception
            Console.WriteLine("Räumliche_Abfrage_gescheitert")
        End Try
        return bool
    End Function
End Class

```

## Baumdetektion durch lokale Maxima

```

Public Function getMaxima(ByRef matrix(,) As Integer, ByRef weite As Integer,
ByRef hoehe As Integer) As Integer(,)
Dim maximas(weite, hoehe) As Integer
Try
    'Durchlaufe Zeilen und Spalten des 2D-Feldes
For ix As Integer=0 To weite-1
    For iy As Integer=0 To hoehe-1

        '3x3 Filter
Dim filter(2,2) As Integer

        'relative Indizes innerhalb des Filters
Dim iFilt, jFilt As Integer
        iFilt=0
        jFilt=0

        'Fülle Werte des Filters
For i As Integer=ix-1 To ix+1
    For j As Integer=iy-1 To iy+1
        Try
            filter(iFilt, jFilt)=matrix(i, j)
        Catch 'Index Out of Bounds
            filter(iFilt, jFilt)=0
        End Try
        jFilt=jFilt+1
    Next
    iFilt=iFilt+1
Next

        'Ermittle Maximum innerhalb des Filters
Dim filtMax As Integer=Statistik.getMax(filter)

        'Entspricht der HotSpot dem Maximum des Filters
If matrix(ix, yi)=filtMax
            maximas(ix, iy)=1
        Else
            maximas(ix, iy)=0
        End If
    Next
Next
Catch e As Exception
    Debug.WriteLine("Fehler bei der Bestimmung der Maxima" & vbCrLf & e.Message)
    return Nothing
End Try
return maximas
End Function

```

## Analyse der Abschattungseffekte

```
Public Function rasterize(ByRef points As GeometryCollection ,  
    ByVal rasterWeite As Double) As ArrayList Try  
    'Rasterhöhe für rechtwinklige Rasterzellen  
Dim rasterWeiteZ As Double=rasterWeite  
Dim halbRw, halbRwZ As Double  
  
    'halbe Rasterweite  
    halbRw=rasterweite/2  
    halbRwZ=rasterweiteZ/2  
  
    'Parameter für die Ausdehnung der Punktauswahl  
Dim diffX, diffZ As Double  
Dim anzahlZeilen, anzahlSpalten As Integer  
  
    'Layerdefinition des 2D-Punktlayers  
Dim layer As New SharpMap.Layers.VectorLayer("Points")  
Dim fdt As New SharpMap.Data.FeatureDataTable  
Dim pseudoColumn As New DataColumn("PSEUDO",System.Type.GetType("System.Double"))  
    fdt.Columns.Add(pseudoColumn)  
  
    'Ermittlung der maximalen Ausdehnung  
Dim xmin, xmax, zmin, zmax As Double  
Dim i1 As Integer=0  
Dim xValsFit(points.Collection.Count-1) As Double  
Dim zValsFit(points.Collection.Count-1) As Double  
For Each point3D As Point3D In points  
    xValsFit(i1)=point3D.x  
    zValsFit(i1)=point3D.Z  
  
    'Erstellung von 2D-Features aus x und z  
Dim objRow As SharpMap.Data.FeatureDataRow=fdt.NewRow  
    objRow.Geometry=New Point(point3D.x,point3D.Z)  
Dim obj(0) As Object  
  
    'Die Y-Koordinate wird als Attribut übernommen  
    obj(0)=point3D.Y  
    objRow.ItemArray=obj  
    fdt.AddRow(objRow)  
  
    'Bedingungsprüfung zur maximalen Ausdehnung  
If i1=0 Then  
    xmin=point3D.x  
    xmax=point3D.x  
    zmin=point3D.Z  
    zmax=point3D.Z  
Else
```

```

If point3D.x<xMin Then
    xMin=point3D.x
End If
If point3D.z<zMin Then
    zMin=point3D.z
End If
If point3D.x>xMax Then
    xMax=point3D.x
End If
If point3D.z>zMax Then
    zMax=point3D.z
End If
End If
    i1=i1+1
Next

'Ausdehnung der Punktauswahl
diffX=xMax-xMin
diffZ=zMax-zMin
anzahlZeilen=diffZ/rasterWeiteZ
anzahlSpalten=diffX/rasterweite

'Layer werden 2D-Features zugeführt
layer.DataSource=New SharpMap.Data.Providers.GeometryFeatureProvider(fdt)

'Berechnung von yMax je Rasterzelle
Dim vals(anzahlZeilen, anzahlSpalten) As Double
Dim yMaxPointsList As New ArrayList
Try
    For i As Integer=0 To anzahlZeilen-1
        For j As Integer=0 To anzahlSpalten-1

            'Parameter für Rastergeometrie
Dim offsetX, offsetZ As Double
            offsetX=xMin+j*rasterweite
            offsetZ=zMin+(diffZ-i*rasterweiteZ)

            'Erzeuge Geometrie für aktuelle Rasterzelle
Dim box As BoundingBox
            box=new BoundingBox(offsetX-halbRw, offsetZ-halbRwZ, _
                offsetX+halbRw, offsetZ+halbRwZ)

            'Welche Punkte liegen innerhalb der Rasterzelle
Dim ds As New SharpMap.Data.FeatureDataSet
            layer.DataSource.ExecuteIntersectionQuery(box, ds)
Dim anzahlPoints=ds.Tables(0).Count
Dim tempPoints As New ArrayList

```

```

Dim xVals(ds.Tables(0).Count-1) As Double
Dim yVals(ds.Tables(0).Count-1) As Double
Dim i2 As Integer=0
For Each row As SharpMap.Data.FeatureDataRow In ds.Tables(0)
    If row.Geometry.Dimension=0 Then
        dim tempPoint As Point=DirectCast(row.Geometry, Point)
        xVals(i2)=tempPoint.X

        'Wert für Y wird aus Attribut geholt
        yVals(i2)=Math.Abs(row.Item(0)) '(negative Werte)
    End If
    i2=i2+1
Next
Dim maxY As Double
If ds.Tables(0).Count>1 Then
    'stdX=Statistik.getStandardAbweichung(xVals)
    'stdY=Statistik.getStandardAbweichung(yVals)

    'Ermittelt Y-Maximum
    maxY=Statistik.getMax(yVals)
    vals(i,j)=maxY
Else
    vals(i,j)=0
End If
Next
Next
Catch exRasterStat As Exception
    Debug.Write(" Fehler_bei_der_Berechnung_der_Punktstatistik")
End Try

'Bedingungsprüfung
Dim vals2(anzahlZeilen, anzahlSpalten) As Double

'SpaltenFilter 1x5 Zellen
Dim filter(2) As Double
For i As Integer=1 To anzahlZeilen-2 'erste und letzte Zeile weglassen
    For j As Integer=0 To anzahlSpalten-1
        filter(0)=vals(i+1,j)
        filter(1)=vals(i,j)
        filter(2)=vals(i-1,j)

        'Prüfen auf Nullzellen
Dim keinNullWert As Boolean=true
For iFilt As Integer=0 To filter.Length-1
        If filter(iFilt)=0 Then
            keinNullWert=false
        End If

```

```

Next

    'Berechnung der Standardabweichung
Dim std As Double=Statistik.getStandardAbweichung(filter)
If keinNullWert=True Then
    If std<0.1 Then
        vals2(i,j)=1
    End If
Else
    vals2(i,j)=0
End If
Next
Next

    'Prüfung auf horizontal zusammenhängende Zellen
Dim vals3(anzahlZeilen, anzahlSpalten) As Double
    'ZeilenFilter 3x1 Zellen
Dim filter2(2) As Double
For i As Integer=0 To anzahlZeilen-1
    For j As Integer=1 To anzahlSpalten-2 'erste und letzte Zeile weglassen
        filter(0)=vals2(i,j+1)
        filter(1)=vals2(i,j)
        filter(2)=vals2(i,j-1)

        'Prüfen auf Nullzellen
Dim keinNullWert As Boolean=true
For iFilt As Integer=0 To filter.Length-1
    If filter(iFilt)=0 Then
        keinNullWert=false
    End If
Next
Next

    'Horizontale Prüfung
    'Gibt es zwei zusammenhängende Zellen
If keinNullWert=True Or Not vals2(i,j)=0 AND vals2(i,j+1)=1 Or Not vals2(i,j)=0
AND vals2(i,j-1)=1 Then
    vals3(i,j)=1
Else
    vals3(i,j)=0
End If
Next
Next

    'Filtere alle Punkte heraus,
    'die bis 10 am y-Maximum der jeweiligen Rasterzelle liegen
For i As Integer=0 To anzahlZeilen-1
    For j As Integer=0 To anzahlSpalten-1

```

```

Dim yMaxTemp As Double=vals(i,j)
If Not yMaxTemp=0 AND vals2(i,j)=1 Or Not yMaxTemp=0 AND vals3(i,j)=1

    'Parameter für Rastergeometrie
Dim offsetX, offSetZ As Double
    offsetX=xMin+j*rasterweite
    offSetZ=zMin+(diffZ-i*rasterweiteZ)

    'Erstelle Geometrie für aktuelle Rasterzelle
Dim box As BoundingBox
    box=new BoundingBox(offsetX-halbRw, offsetZ-halbRwZ, _
        offsetX+halbRw, offsetZ+halbRwZ)
    'Welche Punkte liegen innerhalb der Rasterzelle
Dim ds As New SharpMap.Data.FeatureDataSet
    layer.DataSource.ExecuteIntersectionQuery(box, ds)

    'Definition Schwellwert=yMax-10cm
Dim schwellWertY As Double
    schwellWertY=yMaxTemp+0.1 ' (+ da negatives yMax)
For Each row As SharpMap.Data.FeatureDataRow In ds.Tables(0)
    If row.Geometry.Dimension=0 Then

        'Rückführung der 2D-Features in 3D-Punkte
Dim pseudoPoint As Point=DirectCast(row.Geometry, Point)
Dim tempY As Double=DirectCast(row.Item(0), System.Double)
Dim tempPoint As New Point3D(pseudoPoint.X, tempY, pseudoPoint.Y)

        'liegt der aktuelle Punkt zwischen Ymax und dem Schwellwert
If tempPoint.Y<schwellwertY Then '(< da negatives yMax)
            yMaxPointsList.Add(New Punkt(tempPoint.X, tempPoint.Y, tempPoint.Z))
        End If
    End If
Next
End If
Next
Return yMaxPointsList
Catch ex As Exception
    Debug.Write(" Fehler__ bei__ der__ Rasterauswertung")
End Try
return Nothing
End Function

```

## Startwerte der Kreisangepassung - algebraisch

```

Private Sub calcStartWerte()
    Try
        'Berechnung arithmetisches Mittel der Ausgangskordinaten
        'es wird ein Feld der Länge 3 mit den arithmetischen Mittelwerten
        'für x,y, und z zurückgegeben
        Dim mittel_1() As Double
        mittel_1=Statistik.getArithMittel(points,1)
        'Berechnung arithmetisches Mittel der quadratischen Ausgangskordinaten
        'es wird ein Feld der Länge 3 mit den arithmetischen Mittelwerten
        'für x^2, y^2, und z^2 zurückgegeben
        Dim mittel_2() As Double
        mittel_2=Statistik.getArithMittel(points,2)
        'Berechnung der Schwerpunktskordinaten
        Dim schwerptk_1_pkts(points.Length-1) As Punkt
        Dim schwerptk_2_pkts(points.Length-1) As Punkt
        For si As Integer =0 To points.Length-1
            Dim pt As Punkt=DirectCast(points(si),Punkt)

            'für jeden Punkt wird der Differenzvektor zum Schwerpunkt berechnet
            Dim x_schwer1, y_schwer1, z_schwer1 As Double
            x_schwer1=pt.x-mittel_1(0)
            y_schwer1=pt.y-mittel_1(1)
            z_schwer1=pt.z-mittel_1(2)
            schwerptk_1_pkts(si)=new Punkt(x_schwer1, y_schwer1, z_schwer1)

            'für jeden Punkt wird der Differenzvektor zum quadratischen Schwerpunkt berechnet
            Dim x_schwer2, y_schwer2, z_schwer2 As Double
            x_schwer2=Math.Pow(pt.x,2)-mittel_2(0)
            y_schwer2=Math.Pow(pt.y,2)-mittel_2(1)
            z_schwer2=pt.z-mittel_2(2)
            schwerptk_2_pkts(si)=new Punkt(x_schwer2, y_schwer2, z_schwer2)
        Next

        'Berechnung der Streuungsmaße sx^2, sy^2, sxy
        'Mittel der quadrierten Schwerpunktkordinaten x' und y'
        Dim sx2, sy2, sxy2 As Double
        Dim mittel_s() As Double=Statistik.getArithMittel(schwerptk_1_pkts,2)
        sx2=mittel_s(0)
        sy2=mittel_s(1)

        'Mittel der multiplizierten Schwerpunktkoorden x' * y'
        Dim sXY As Double
        sXY=Statistik.getQuadArithMittel(schwerptk_1_pkts)

        'Aufstellen der Normalgleichungsmatrix N
        Dim N(2,2) As Double
    
```

```

N(0,0)=sx2
N(0,1)=sXY
N(1,0)=sXY
N(1,1)=sy2
' Inverse Normalgleichungsmatrix  $N^{-1}$ 
Dim N_invers(2,2) As Double
N_invers(0,0)=sy2
N_invers(0,1)=-sXY
N_invers(1,0)=-sXY
N_invers(1,1)=sx2

'rechte Seite des Normalgleichungssystems n
Dim n1, n2 As Double
Dim liste_n1(schwerptk_1_pkts.Length-1) As Double
Dim liste_n2(schwerptk_1_pkts.Length-1) As Double
Try
    'n1
    For iN1 As Integer=0 To schwerptk_1_pkts.Length-1
        Dim temp1 As Double
        temp1=schwerptk_1_pkts(iN1).x*(schwerptk_2_pkts(iN1).x
        liste_n1(iN1)=temp1+schwerptk_2_pkts(iN1).y)
    Next
    n1=Statistik.getArithMittelListe(liste_n1)
    'n2
    For iN2 As Integer=0 To schwerptk_1_pkts.Length-1
        Dim temp2 As Double
        temp2=schwerptk_1_pkts(iN2).y*(schwerptk_2_pkts(iN2).x
        liste_n2(iN2)=temp2+schwerptk_2_pkts(iN2).y)
    Next
    n2=Statistik.getArithMittelListe(liste_n2)
Catch eN1_2 As Exception
    Console.WriteLine(eN1_2.Message)
End Try

'n wird gefüllt
Dim n_rechts(2,0) As Double
n_rechts(0,0)=n1
n_rechts(1,0)=n2

'Multiplikation  $N^{-1} * n$  der Normalgleichung
Dim C(,) As Double
C = MatLib.Multiply(N_invers, n_rechts)

'Startwerte
'Mittelpunkt
xStart=1/(sx2*sy2-(sxy*sxy))*(sy2*n1-sxy*n2)*0.5
yStart=1/(sx2*sy2-(sxy*sxy))*(sx2*n2-sxy*n1)*0.5

```

```

    'Radius
    Dim r_2 As Double
    r_2=Math.Pow(xStart-mittel_1(0),2)+Math.Pow(yStart-mittel_1(1),2)+sx2+sy2
    rStart=Math.Sqrt(r_2)
    Catch exStart As Exception
        Debug.Write("Fehler_bei_der_Berechnung_der_Startwerte")
    End Try
End Sub

```

## Geometrische Kreis Anpassung

```

Private Sub calcBestFit
    Try
        'Geometrischer Fit

        'Radien für Startwerte
        Dim di(points.Length-1) As Double

        'Streuungsmaße
        Dim cx2(points.Length-1) As Double
        Dim cy2(points.Length-1) As Double
        Dim cxy(points.Length-1) As Double

        'Mittelwerte der Radien als Verhältnis der zu den Koordinatenunterschieden
        Dim dxi(points.Length-1) As Double
        Dim dyi(points.Length-1) As Double

        'Berechnung arithmetisches Mittel der Ausgangskordinaten
        'es wird ein Feld der Länge 3 mit den arithmetischen Mittelwerten
        'für x, y, und z zurückgegeben
        Dim mittel_1() As Double
        mittel_1=Statistik.getArithMittel(points,1)
        For j As Integer = 0 To points.Length-1
            'Durchmesser für jeden Punkt
            Dim point_j As Punkt=DirectCast(points(j),Punkt)
            di(j) =Math.Sqrt(Math.Pow(point_j.x-xN,2)+Math.Pow(point_j.y-yN,2))

            'Listen für Streuungsmaße
            cx2(j) = Math.Pow(((point_j.x-xN)/di(j)),2)
            cy2(j) = Math.Pow(((point_j.y-yN)/di(j)),2)
            cxy(j) = (point_j.x-xN)*(point_j.y-yN)/Math.Pow(di(j),2)

            'Listen für Mittelwerte der Radien als Verhältnis zu den Koordinatenunterschieden
            dxi(j) = (point_j.x-xN)/di(j)
            dyi(j) = (point_j.y-yN)/di(j)
        Next

        'Streuungsmaße

```

```

Dim s_x2 As Double=Statistik.getArithMittelListe(cx2)
Dim s_y2 As Double=Statistik.getArithMittelListe(cy2)
Dim s_xy As Double=Statistik.getArithMittelListe(cxy)

' Mittelwerte der Radien
Dim dQuer As Double=Statistik.getArithMittelListe(di)
Dim dxQuer As Double=Statistik.getArithMittelListe(dxi)
Dim dyQuer As Double=Statistik.getArithMittelListe(dyi)

' Listen für Parameter der Normalgleichungsmatrix
Dim sdXi(points.Length-1) As Double
Dim sdYi(points.Length-1) As Double
Dim sdXYi(points.Length-1) As Double

For j As Integer= 0 To points.Length-1
    Dim point_j As Punkt=DirectCast(points(j),Punkt)
    sdXi(j) = Math.Pow((point_j.x-xN)/di(j)-dxQuer,2)
    sdYi(j) = Math.Pow((point_j.y-yN)/di(j)-dyQuer,2)
    sdXYi(j) = ((point_j.x-xN)/di(j)-dxQuer)*((point_j.y-yN)/di(j)-dyQuer)
Next

' Parameter der Normalgleichungsmatrix
Dim sx2_dx2 As Double=Statistik.getArithMittelListe(sdXi)
Dim sy2_dy2 As Double=Statistik.getArithMittelListe(sdYi)
Dim sxy_dxdy As Double=Statistik.getArithMittelListe(sdXYi)
sx2_dx2_=sx2_dx2
sy2_dy2_=sy2_dy2
sxy_dxdy_=sxy_dxdy

' Normalgleichungsmatrix
Dim N_2(1,1) As Double
N_2(0,0)=sx2_dx2
N_2(0,1)=sxy_dxdy
N_2(1,0)=sxy_dxdy
N_2(1,1)=sy2_dy2

' Determinante der Normalgleichungsmatrix ' Cramersche Regel
Dim det As Double
det=sx2_dx2_*sy2_dy2_-sxy_dxdy_*sxy_dxdy

' rechte Seite des Normalgleichungssystems n
Dim n_r(1,1) As Double
n_r(0,0)=mittel_1(0)-xN-dxQuer*dQuer
n_r(1,0)=mittel_1(1)-yN-dyQuer*dQuer

' Inverse der Normalgleichungsmatrix 1/det*Matrix
Dim n_inv(1,1) As Double

```

```

n_inv(0,0)=1/det*sy2_dy2
n_inv(0,1)=1/det*(-sxy_dxdy)
n_inv(1,0)=1/det*(-sxy_dxdy)
n_inv(1,1)=1/det*sx2_dx2

' Multiplikation N^-1 * n der Normalgleichung
Dim deltaXY(,) As Double
deltaXY = MatLib.Multiply(N_inv, n_r)

' geometische ausgeglichener Mittelpunkt
xO=xN+deltaXY(0,0)
yO=yN+deltaXY(1,0)

' Entfernung zwischen Startwert und geometische ausgeglichenem Mittelpunkt
E=Math.sqrt(Math.Pow(deltaXY(0,0),2)+Math.Pow(deltaXY(1,0),2))

' Radien für jeden Punkt
Dim di_2(points.Length-1) As Double
For j As Integer = 0 To points.Length-1
    ' Durchmesser für jeden Punkt
    Dim point_j As Punkt=DirectCast(points(j),Punkt)
    di_2(j) =Math.Sqrt(Math.Pow(point_j.x-xO,2)+Math.Pow(point_j.y-yO,2))
Next

' Radius aus dem Mittel der Radien aller Punkte
rO=Statistik.getArithMittelListe(di_2)

Catch exFit As Exception
    Debug.Write(" Fehler_beim_geometrischen_Fit")
End Try
End Sub

```