

Masterarbeit

Berechnung von charakteristischen Eigen-schaften von botanischen Bäumen mithilfe von 3D-Punktwolken.

Name: Anton Wetzel

E-Mail: anton.wetzel@tu-ilmenau.de

Matrikelnummer: 60451

Studiengang: Informatik Master

Betreuer: Tristan Nauber

E-Mail: tristan.nauber@tu-ilmenau.de

Professor: Prof. Dr.-Ing. Patrick Mäder

E-Mail: patrick.maeder@tu-ilmenau.de

Fachgebiet: Data-intensive Systems and Visualiza-tion Group

Datum: 21.04.2024



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU**

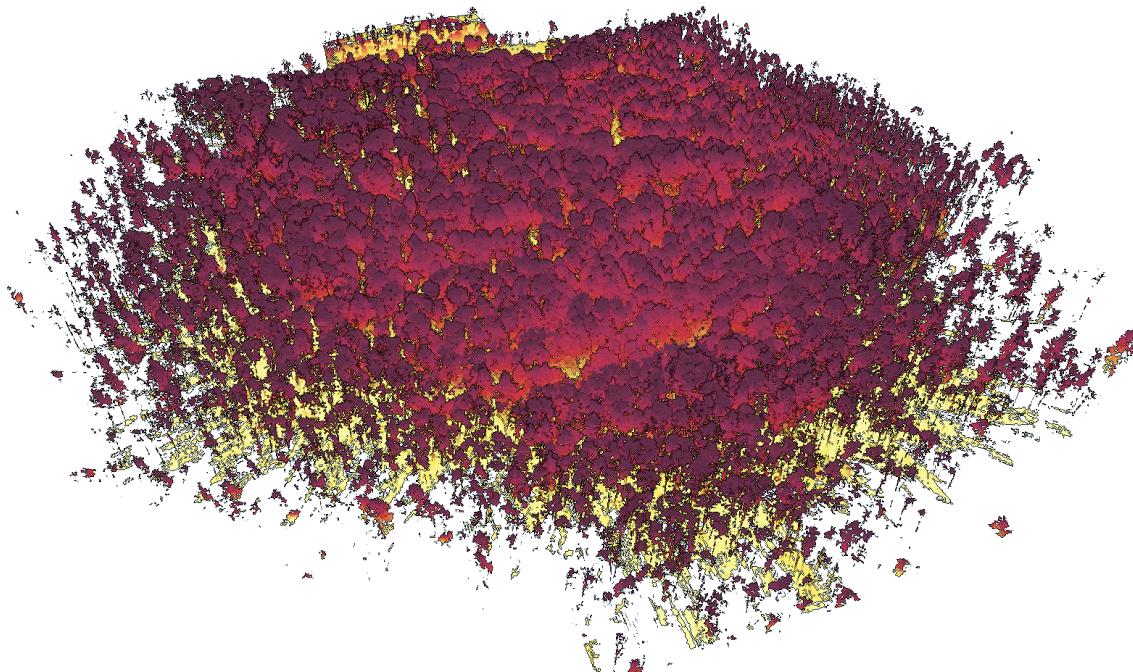
Abstrakt

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Verarbeitung, Analyse und Visualisierung von Waldgebieten mithilfe von Punktwolken. Dabei wird der komplette Ablauf vom Datensatz bis zur Visualisierung der einzelnen Bäume mit relevanten Informationen durchgeführt.

Ein Datensatz ist dabei ein Lidar-Scan von einem Waldgebiet, welcher als Liste von Punkten gegeben ist. Die Punkte können in beliebiger Reihenfolge abgespeichert sein und für jeden Punkt wird nur die dreidimensionale Position benötigt.

Zuerst werden die Punkte automatisch in einzelne Bäume unterteilt. Die Analyse berechnet für die Bäume und einzelne Punkte danach relevante Informationen und die Daten werden für die Visualisierung in Echtzeit vorbereitet.

In dem zugehörigen Softwareprojekt sind die vorgestellten Methoden, Datenstrukturen und Algorithmen umgesetzt. Die Analyse und Visualisierung der Waldgebiete werden mit der Umsetzung getestet und ausgewertet.



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Themenbeschreibung.....	2
1.3 Struktur der Arbeit.....	2
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Punktdaten.....	4
2.2 Analyse.....	4
2.3 Rekonstruktion.....	5
3 Segmentierung von Waldgebieten.....	6
3.1 Ablauf.....	6
3.2 Bereiche bestimmen.....	6
3.3 Koordinaten bestimmen.....	7
3.4 Punkte zuordnen.....	8
4 Visualisierung.....	10
4.1 Punkte.....	10
4.1.1 Mögliche Polygone.....	10
4.1.2 Anzeigen im dreidimensionalen Raum.....	11
4.2 Detailstufen.....	12
4.2.1 Berechnung der Detailstufen.....	13
4.3 Eye-Dome-Lighting.....	14
5 Triangulierung.....	16
5.1 Ziel.....	16
5.2 Ball-Pivoting Algorithmus.....	16
5.2.1 α -Kugel für ein Dreieck.....	16
5.3 Ablauf.....	17
5.3.1 KD-Baum berechnen.....	17
5.3.2 Startdreieck bestimmen.....	17
5.3.3 Triangulierte Bereich erweitern.....	17

5.3.4	Komplettes Segment triangulieren.....	20
5.4	Vorauswahl.....	20
5.5	Auswahl von α	21
6	Analyse von Bäumen.....	22
6.1	Eingabedaten.....	22
6.2	Punkteigenschaften.....	22
6.2.1	Relative Höhe.....	23
6.2.2	Krümmung.....	23
6.2.3	Eigenschaften für die Visualisierung.....	24
6.3	Baumeigenschaften.....	25
6.3.1	Unterteilung in Scheiben.....	25
6.3.2	Bodenhöhe.....	26
6.3.3	Stammdurchmesser.....	26
6.3.4	Baumhöhe.....	27
6.3.5	Durchmesser von der Baumkrone.....	27
7	Implementierung.....	28
7.1	Technik.....	28
7.2	Benutzung.....	29
7.2.1	Installation.....	29
7.2.2	Ausführen.....	29
7.2.3	Import.....	29
7.2.4	Visualisierung.....	30
7.3	Struktur vom Quelltext.....	32
7.4	Import.....	33
7.4.1	Parallelisierung.....	33
7.5	Format für eine Punktfolge.....	34
7.5.1	Daten.....	34
7.6	Visualisierung.....	35
7.6.1	Punkte.....	35
7.6.2	Segmente.....	36
7.6.3	Detailstufen.....	38

8 Auswertung.....	39
8.1 Testdaten.....	39
8.2 Importgeschwindigkeit.....	39
8.3 Segmentierung von Waldgebieten.....	41
8.4 Triangulierung.....	43
8.5 Visualisierung.....	43
8.6 Analyse von Bäumen.....	45
8.6.1 Punkteigenschaften.....	45
8.6.2 Baumeigenschaften.....	46
9 Fazit.....	50
9.1 Segmentierung.....	50
9.2 Analyse.....	50
9.3 Visualisierung.....	50
9.4 Ausblick.....	51
10 Appendix.....	53
10.1 Glossar.....	53
10.2 KD-Baum.....	54
10.2.1 Konstruktion.....	54
10.2.2 Suche mit festem Radius.....	55
10.2.3 Suche mit fester Anzahl.....	55
10.2.4 Verbesserte Suche für kleine Teilbäume.....	55
10.3 Baum (Datenstruktur).....	56
10.3.1 Konstruktion.....	56
10.3.2 Suchanfrage.....	56
10.4 Systemeigenschaften.....	57
10.5 Messwerte vom Import.....	58
Eigenständigkeitserklärung.....	60
Bibliographie.....	61

1 Einleitung

1.1 Motivation

Größere Gebiete wie Teile von Wäldern können mit 3D-Scanners abgetastet werden. Dabei wird entweder vom Boden aus ein Waldgebiet abgetastet oder der Scanner ist an einem Flugzeug oder einer Drohne befestigt, womit der gewünschte Bereich abgeflogen wird. Dabei entsteht eine Punktwolke, bei der für jeden Punkt mindestens die dreidimensionale Position bekannt ist.

Aus den Punkten sind relevante Informationen aber nicht direkt ersichtlich. Eine manuelle Weiterverarbeitung ist durch die großen Datenmengen unrealistisch, weshalb automatisierte Methoden benötigt werden.

Vor der Analyse müssen die Punktwolken zuerst in die einzelnen Bäume unterteilt werden. Danach können für jeden Baum die gewünschten Eigenschaften berechnet werden. Dazu gehört die Höhe vom Stamm, der Krone und dem gesamten Baum und der Durchmesser vom Stamm bei Brusthöhe und der Baumkrone.

Eine Visualisierung der Punktwolke und der berechneten Daten ermöglicht einen Überblick über das gescannte Waldgebiet. Ein Beispiel für so eine Visualisierung ist in [Abbildung 1](#) gegeben. Es sind die Punkte vom Datensatz zu sehen, welche basierend auf der relativen Höhe im Baum eingefärbt sind. Dadurch ist der Boden in Gelb und zu den Baumspitzen hin ändert sich die Farbe der Punkte zu Rot.

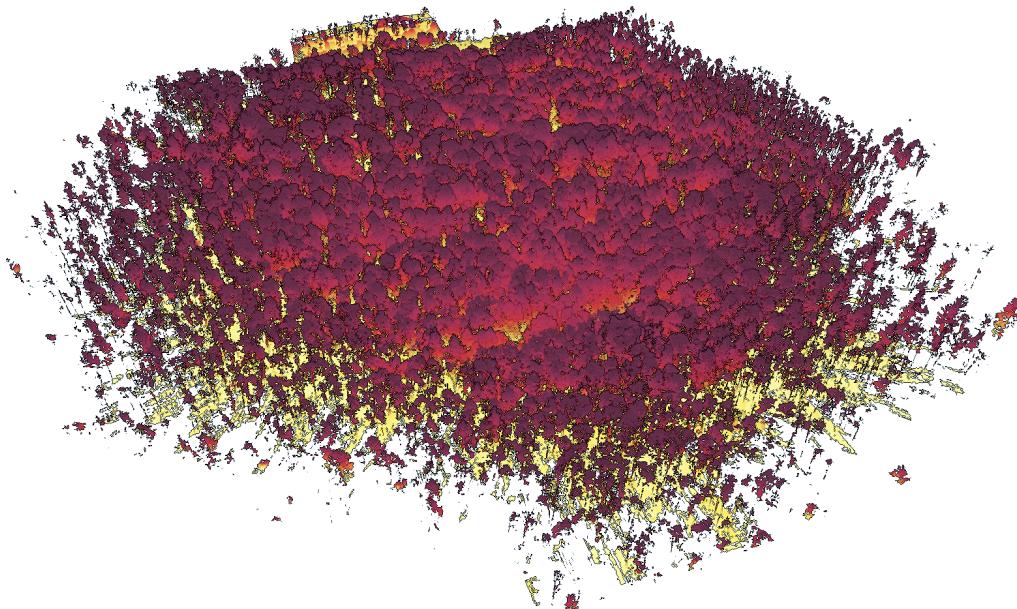


Abbildung 1: Waldgebiet mit den Punkten basierend auf der relativen Höhe im Baum eingefärbt.

1.2 Themenbeschreibung

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Erforschung des Ablaufs von einem Scan von einem Waldgebiet bis zur Analyse der Daten mit zugehöriger interaktiven Visualisierung der Ergebnisse.

Als Eingabe wird der Datensatz vom Waldgebiet benötigt. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Datensatz eine ungeordnete Menge von Punkten enthält, für die nur die Position im dreidimensionalen Raum bekannt ist. Je nach Scanner können die Punkte im Datensatz entsprechend der räumlichen Verteilung geordnet sein oder weitere Eigenschaften wie die Farbe der abgetasteten Oberfläche enthalten. Weil nur die Position bei der Analyse betrachtet wird, kann die Auswertung auch für Datensätze durchgeführt werden, welche keine weiteren Informationen enthalten.

Für die Analyse der Daten muss die Menge der Punkte zuerst in einzelne Bäume unterteilt werden. Dafür wird für jeden Baum ein Segment bestimmt, welches alle zugehörigen Punkte enthält. Danach können die einzelnen Bäume ausgewertet werden. Durch die Beschränkung auf Waldgebiete kann die Segmentierung und die folgende Auswertung auf Bäume spezialisiert werden.

Bei der Auswertung werden charakteristische Eigenschaften für die Bäume, aber auch für die einzelnen Punkte im Baum bestimmt. Für Bäume werden Eigenschaften bestimmt, welche den ganzen Baum beschreiben. Für Punkte werden die Eigenschaften für die lokale Umgebung berechnet.

Die Visualisierung präsentiert die berechneten Ergebnisse. Für die Bäume und die Punkte werden die Daten mit den berechneten Eigenschaften dargestellt und können interaktiv inspiziert werden. Dabei werden die Punkte vom gesamten Datensatz, einzelne Segmente mit den Punkten oder eine triangulierte Oberfläche angezeigt.

1.3 Struktur der Arbeit

Abschnitt 1: Einleitung

In der Einleitung wird die Motivation für die Arbeit erklärt, das Thema definiert und die Struktur der Arbeit vorgestellt.

Abschnitt 2: Stand der Technik

Der Stand der Technik beschäftigt sich mit wissenschaftlichen und technischen Arbeiten zugehörigen zum Thema. Dazu gehört die Aufnahme und Verarbeitung von Punktdata und die Analyse von Bäumen mit den Daten.

Abschnitt 3: Segmentierung von Waldgebieten

Die Segmentierung erklärt den verwendeten Algorithmus für die Unterteilung von einer Punktfolge von einem Waldgebiet in mehrere Punktfolgen für jeweils ei-

nen Baum. Von den Baumspitzen aus wird die Position der Bäume berechnet und die Punkte werden dem nächsten Baum zugeordnet.

Abschnitt 4: Visualisierung

Im Abschnitt Visualisierung wird die Methodik erklärt, um die Punktewolken oder einzelne Segmente mit allen gegebenen und berechneten Daten in Echtzeit zu rendern. Dafür wird das Anzeigen von einzelnen Punkten, Detailstufen und die Visualisierung von den Tiefeninformationen erklärt.

Abschnitt 5: Triangulierung

Bei der Triangulierung wird für die Punktewolke von einem Baum ein geeignetes Dreiecksnetz für die Oberfläche vom Baum gesucht. Mit dem Dreiecksnetz und den Punkten kann für den Baum ein dreidimensionales Mesh erstellt werden.

Abschnitt 6: Analyse von Bäumen

Bei der Analyse werden mit der Punktewolke von einem Baum die charakteristischen Eigenschaften für den Baum und einzelne Punkte berechnet. Für den Baum wird der Durchmesser vom Stamm und der Krone abgeschätzt und die Höhe vom Stamm, der Krone und dem gesamten Baum bestimmt. Für die einzelnen Punkte wird die relative Höhe im Baum, die lokale Krümmung und die benötigten Eigenschaften für die Visualisierung berechnet.

Abschnitt 7: Implementierung

Das Softwareprojekt mit der technischen Umsetzung der Algorithmen wird in der Implementierung vorgestellt. Dafür wird die Bedienung und die Struktur vom Programm erklärt. Für den Import wird der Ablauf und das verwendete Dateiformat vorgestellt und für die Visualisierung werden die verwendeten Algorithmen für das Anzeigen von Punkten, Segmenten und Detailstufen ausgeführt.

Abschnitt 8: Auswertung

Bei der Auswertung werden die in der Arbeit vorgestellten Methoden analysiert. Dafür werden die benutzten Datensätze vorgestellt, mit denen der Ablauf bis zur Visualisierung getestet wurde. Für die charakteristischen Eigenschaften der Bäume werden die berechneten Werte mit den gemessenen Werten im Datensatz verglichen.

Abschnitt 9: Fazit

Im Fazit werden die Ergebnisse der Auswertung eingeordnet und mögliche Verbesserungen angesprochen und weitere Verarbeitungsschritte der berechneten Daten vorgestellt.

Abschnitt 10: Appendix

Im Appendix werden benutzte Begriffe und Datenstrukturen erklärt und die verwendeten Systemeigenschaften und Messdaten für die Auswertung gelistet.

2 Stand der Technik

2.1 Punktdaten

Die Erfassung von Punktwolken kann durch verschiedene Lidar-Scanverfahren erfolgen. Aufnahmen vom Boden oder aus der Luft bieten dabei verschiedene Vor- und Nachteile (Donager, Sánchez Meador, und Blackburn 2021). Bei einem Scan vom Boden aus wird eine kleinere Fläche mit hoher Genauigkeit abgetastet, wodurch einzelne Bäume genau analysiert werden können (Disney 2019). Aus der Luft werden größere Flächen mit gleichbleibender Genauigkeit erfasst, wodurch größere Waldgebiete aufgenommen werden können. Dafür ist die Punktanzahl pro Baum geringer, was eine Analyse der einzelnen Bäume erschwert (Suzuki u. a. 2021).

Alternativ zu Lidar kann auch DAP¹ als Datenquelle verwendet werden (White u. a. 2013). Dabei wird von einer Drohne oder einem Flugzeug mehrere Bilder vom Waldgebiet gemacht, mit denen die Höheninformationen bestimmt werden. Im Vergleich zu Lidar ist die Datengewinnung günstiger, dafür enthalten die DAP-Daten nur Informationen über die Baumkronen, weil nur diese von der Drohne oder dem Flugzeug sichtbar sind (Goodbody, Coops, und White 2019).

Lidar-Daten können im LAS Dateiformat abgespeichert werden (Graham 2012). Bei diesem werden die Messpunkte als Liste mit den bekannten Punkteigenschaften gespeichert. Je nach Messtechnologie können die erfassten Daten bei unterschiedlichen Punktwolken variieren, aber die dreidimensionale Position der Punkte ist immer gegeben. Aufgrund der großen Datenmengen werden LAS Dateien häufig im komprimierten LASzip Format gespeichert (Isenburg 2013). Die Kompression ist verlustfrei und ermöglicht eine Kompressionsrate zwischen 5 und 15 je nach Eingabedaten.

LAStools ist eine Sammlung von Software für die allgemeine Verarbeitung von LAS Dateien (Hug, Krzystek, und Fuchs 2004). Dazu gehört die Umwandlung in andere Dateiformate, Analyse der Daten und Visualisierung der Punkte. Durch den allgemeinen Fokus ist die Software nicht für die Verarbeitung von Wäldern ausgelegt, wodurch Funktionalitäten wie die Berechnungen von Baumeigenschaften mit zugehöriger Visualisierung nicht gegeben sind.

2.2 Analyse

Die Punktwolke kann für die Analyse vom abgetasteten Gebiet verwendet werden. Für agrarisch verwendete Nutzflächen kann der momentane Stand von den Pflanzen bestimmt werden und das weitere Vorgehen kann daran angepasst werden (Rivera u. a. 2023).

Mit der Punktwolke von einem Baum können charakteristische Informationen abgeschätzt werden. Aus der Verteilung der Punkte kann die Höhe vom Stamm, der Krone und vom ganzen Baum berechnet werden (Suzuki, Shiozawa, Yamaba, und

¹digital aerial photogrammetry

[Amano 2021](#)). Ein weiterer relevanter Messwert ist der Durchmesser vom Stamm bei 1,3 m über dem Boden ([H. Weiser u. a. 2022](#)). Aus den Messwerten können Eigenschaften wie das Alter vom Baum oder die aufgenommene Menge von Kohlenstoffdioxid, welche schwer zu messen sind, abgeschätzt werden.

Mit Punktwolken kann auch die Baumspezies bestimmt werden. Dafür kann die Verteilung der Punkte zugehörig zur Baumkrone benutzt werden ([Holmgren und Persson 2004](#)). Mit hochauflösenden Daten kann ein Profil von der Rinde bestimmt werden, welches für die Einordnung verwendet wird ([Othmani u. a. 2013](#)). Zusätzlich zu den Punktwolken können auch hyperspektrale Bilder vom Gebiet als eine weitere Datenquelle dienen, wodurch die Klassifikation verbessert werden kann ([Ghosh u. a. 2014; Dalponte, Bruzzone, und Gianelle 2012](#)).

Für Waldgebiete wird die Punktwolke automatisch oder manuell in Segmente unterteilt ([Burt, Disney, und Calders 2019; H. Weiser u. a. 2022](#)), welche wie die einzelnen Bäume weiter analysiert werden können. Aus den kombinierten Daten von den einzelnen Bäumen kann eine Forstinventur berechnet werden ([Proudman u. a. 2022](#)). Wenn zeitlich versetzte Datensätze vom gleichen Waldgebiet existieren, kann daraus auch die Entwicklung von den Bäumen abgeschätzt werden ([Tompalski u. a. 2021](#)).

2.3 Rekonstruktion

Aus den Punktwolken können die ursprünglich abgetasteten Objekte rekonstruiert werden. Dazu gehören Objekte wie Gebäude und Straßen, aber auch Bäume ([Wang, Peethambaran, und Chen 2018](#)).

Für die Rekonstruktion von Bäumen kann vom Boden aus zuerst der Stamm, dann die Äste und final die Blätter bestimmt werden ([Zhang u. a. 2014](#)). Für die Berechnung der Baumstruktur können auch neuronale Ansätze verwendet werden ([Liu u. a. 2021](#)). Mit einer Rekonstruktion vom Baum kann das Holzvolumen geschätzt werden ([Hackenberg u. a. 2015](#)). Dafür werden der Stamm und die Äste mit Zylindern approximiert, mit denen das totale Holzvolumen berechnet wird.

Für die Analyse von einzelnen Bäumen können mehrere Fotografien als alternative Datenquelle verwendet werden ([Guo u. a. 2020](#)). Für die Fotos werden die Tiefeinformationen geschätzt, womit eine dreidimensionale Rekonstruktion ermöglicht wird. Das Verfahren ist nur für die Rekonstruktion von einzelnen Bäumen geeignet, dafür sind Farbinformationen vorhanden, womit realistische Modelle erstellt werden können.

3 Segmentierung von Waldgebieten

3.1 Ablauf

Für die Segmentierung werden alle Punkte in gleich breite parallele Scheiben entlang der Höhe unterteilt. Danach werden die Scheiben von Oben nach Unten einzeln verarbeitet, um die Segmente zu bestimmen. Dafür werden die Punkte in einer Scheibe zu zusammenhängenden Bereichen zusammengefasst. Mit den Bereichen werden die Koordinaten der Bäume bestimmt, welche in der momentanen Scheibe existieren. Die Punkte in der Scheibe werden dann dem nächsten Baum zugeordnet.

3.2 Bereiche bestimmen

Für jede Scheibe werden konvexe zusammenhängende Bereiche bestimmt, dass die Punkte in unterschiedlichen Bereichen einen Mindestabstand voneinander entfernt sind. Dafür wird der leeren Menge von Bereichen gestartet und jeder Punkt zu der Menge hinzugefügt. Wenn ein Punkt vollständig in einem Bereich enthalten ist, wird der Bereich nicht erweitert. Ist der Punkt außerhalb, aber näher als den Mindestabstand zu einem der Bereiche, so wird der Bereich erweitert. Ist der Punkt von allen bisherigen Bereichen weiter entfernt, so wird ein neuer Bereich angefangen.

Dadurch entstehen Bereiche wie in Abbildung 2. Bei einer Baumspitze entsteht ein kleiner Bereich. Wenn mehrere Bäume sich berühren, werden die zugehörigen Punkte zu einem größeren Bereich zusammengefasst.



Abbildung 2: Beispiel für berechnete Segmente für zwei aufeinanderfolgende Scheiben.

Bei der Berechnung sind alle momentanen Bereiche in einer Liste gespeichert. Ein Bereich ist dabei eine Liste von Eckpunkten. Die Eckpunkte sind dabei sortiert, dass für einen Eckpunkt der nächste Punkt entlang der Umrandung vom Bereich

der nächste Punkt in der Liste ist. Für den letzten Punkt ist der erste Punkt in der Liste der nächste Eckpunkt.

Um einen Punkt zu einem Bereich hinzuzufügen wird wie in [Abbildung 3](#) für jede Kante der Abstand zum Punkt bestimmt und Kanten mit positivem Abstand werden ausgetauscht.

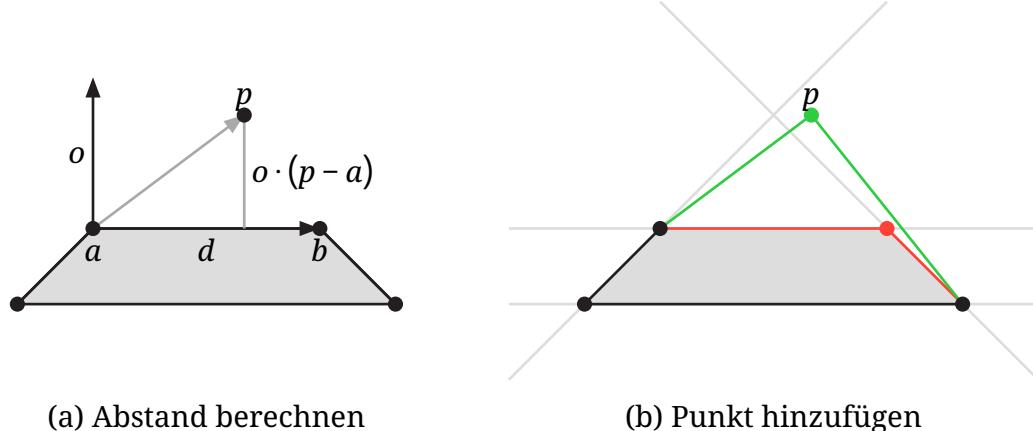


Abbildung 3: Hinzufügen von einem neuen Eckpunkt zu einem Bereich.

Um die Distanz von einem Punkt zu einem Bereich zu berechnen, wird der größte positive Abstand vom Punkt zu allen Kanten berechnet. Für jede Kante mit den Eckpunkten $a = (a_x, a_y)$ und $b = (b_x, b_y)$ wird zuerst der Vektor $d = (d_x, d_y) = b - a$ berechnet. Der normalisierte Vektor $o = \frac{1}{\|d\|} \cdot (d_y, -d_x)$ ist orthogonal zu d und zeigt aus dem Bereich hinaus, solange a im Uhrzeigersinn vor b auf der Umrandung liegt. Für den Punkt p kann nun der Abstand zur Kante mit dem Skalarprodukt $o \cdot (p - a)$ berechnet werden. Wenn der Punkt auf der Innenseite der Kante liegt, ist der Abstand negativ.

Um einen Punkt zu einem Bereich hinzuzufügen, werden alle Kanten entfernt, bei denen der Punkt außerhalb liegt, und zwei neue Kanten zum Punkt werden hinzugefügt. Dafür werden die Eckpunkte entfernt, bei denen der neue Punkt außerhalb der beiden angrenzenden Kanten liegt. An der Stelle, wo die Punkte entfernt wurden, wird stattdessen der neue Eckpunkt eingefügt.

3.3 Koordinaten bestimmen

Für die Bäume der momentanen Scheibe werden die Koordinaten gesucht. Die Menge der Koordinaten startet mit der leeren Menge für die höchste Scheibe. Bei jeder Scheibe wird die Menge der Koordinaten mit den gefundenen Bereichen aktualisiert. Dafür wird für alle Bereiche in der momentanen Scheibe die Fläche und der Schwerpunkt wie in [Abbildung 4](#) berechnet.

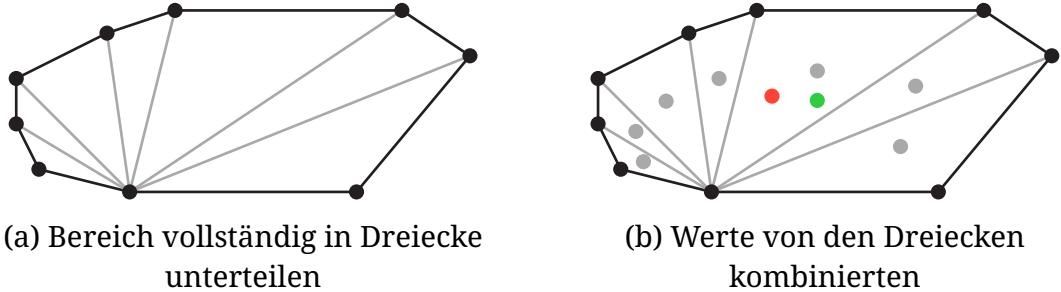


Abbildung 4: Fläche und Schwerpunkt für einen konvexen Bereich.

Weil die Bereiche konvex sind, können diese trivial in Dreiecke unterteilt werden. Dafür wird ein beliebiger Punkt ausgewählt und für jede Kante, die nicht zum Punkt gehört, wird ein Dreieck gebildet. Die Fläche vom Bereich ist die Summe von den Flächen von den Dreiecken. Für den Schwerpunkt wird für jedes Dreieck der Schwerpunkt berechnet und dieser mit der Fläche vom zugehörigen Dreieck gewichtet.

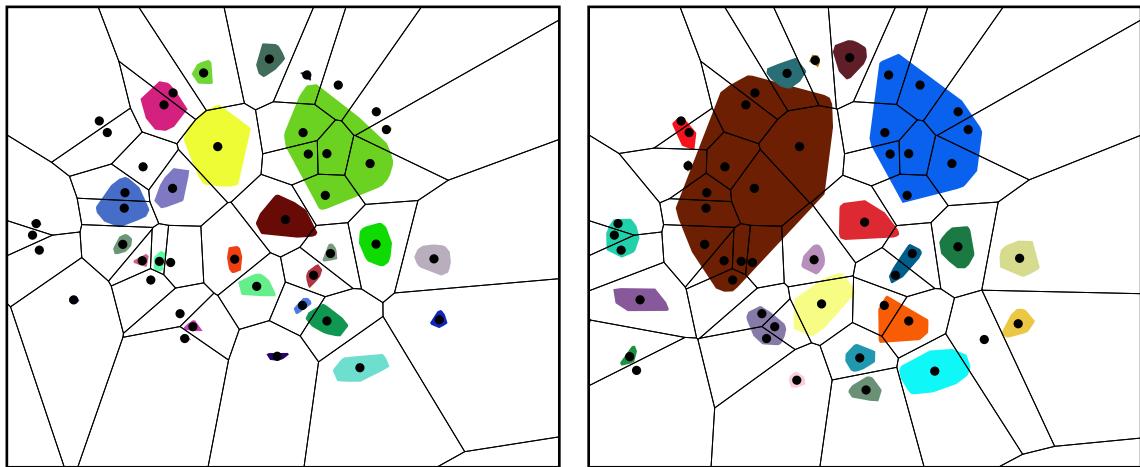
Weil die konvexe Hülle von allen Punkten in einem Bereich gebildet wird, können Bereiche sich überscheiden, obwohl die Punkte der Bereiche den Mindestabstand voneinander entfernt sind. Bei dem Hinzuzufügen von neuen Punkten werden die Bereiche sequentiell iteriert, wodurch bei überschneidenden Bereichen der erste präferiert wird. Dadurch wächst der erste Bereich und die späteren Bereiche bleiben klein. Nachdem alle Punkte hinzugefügt würden, werden deshalb die Bereiche gefiltert. Alle Bereiche mit einem Zentrum in einem anderen Bereich oder einer Fläche kleiner als ein Schwellwert werden entfernt.

Danach werden die Koordinaten aus den vorherigen Scheiben mit den Schwerpunkten der Bereiche von der momentanen Scheibe aktualisiert. Für jede Koordinate wird der nächste Schwerpunkt näher als die zweifache Maximaldistanz bestimmt. Wenn ein naher Schwerpunkt gefunden wurde, wird die Koordinate mit der Position vom Schwerpunkte aktualisiert. Wenn kein naher Schwerpunkt existiert, so bleibt die Position gleich.

Für alle Schwerpunkte, welche nicht nah an einer der vorherigen Koordinaten liegen, wird ein neues Segment angefangen. Dafür wird der Schwerpunkt zur Liste der Koordinaten hinzugefügt.

3.4 Punkte zuordnen

Mit den Koordinaten wird das Voronoi-Diagramm berechnet, welches den Raum in Bereiche unterteilt, dass alle Punkte in einem Bereich für eine Koordinate am nächsten an dieser Koordinate liegen. Für jeden Punkt wird nun der zugehörige Bereich im Voronoi-Diagramm bestimmt und der Punkt zum zugehörigen Segment zugeordnet. Ein Beispiel für so eine Unterteilung ist in [Abbildung 5](#) zu sehen.



(a) Höhere Scheibe

(b) Tiefere Scheibe

Abbildung 5: Berechnete Koordinaten für die Punkte mit zugehörigen Bereichen und Voronoi-Diagramm.

Der Ablauf wird für alle Scheiben von Oben nach Unten durchgeführt, wodurch alle Punkte zu Segmenten zugeordnet werden. In [Abbildung 6](#) ist die Segmentierung für eine Punktfolke gegeben. Die unterschiedlichen Segmente sind durch unterschiedliche Einfärbung der zugehörigen Punkte markiert.



Abbildung 6: Segmentierung von einem Waldgebiet.

4 Visualisierung

4.1 Punkte

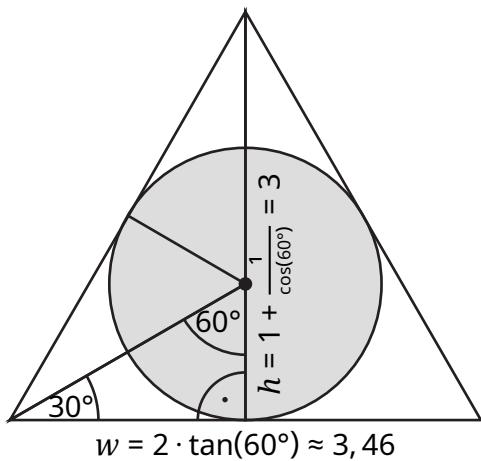
Grafikpipelines haben mehrere primitive Formen, welche gerendert werden können. Die verfügbaren primitiven Formen sind meistens Punkte, Linien und Dreiecke, wobei Dreiecke immer verfügbar sind. Für das Anzeigen von komplizierter Modellen werden mehrere primitive Formen zusammengesetzt.

Der primitive Punkt hat dabei keine Größe, sondern wird mit genau einem Pixel dargestellt. Um einen Punkt mit einer Größe anzeigen, werden Dreiecke als primitive Form verwendet. Dabei hat ein Dreieck beliebige Eckpunkte und die Grafikpipeline färbt alle Pixel ein, welche zwischen den Eckpunkten liegen.

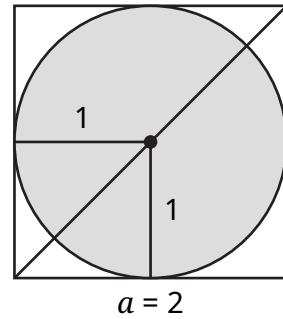
Um einen Kreis zu rendern, kann ein beliebiges Polygon gerendert werden, so lange der gewünschte Kreis vollständig enthalten ist. Die Pixel, welche außerhalb vom Kreis liegen, werden beim Rendern verworfen, wodurch nur der Kreis übrig bleibt. Je mehr Ecken das Polygon hat, desto kleiner ist der Bereich vom Polygon, der nicht zum Kreis gehört. Jede Ecke und der benötigte Bereich erhöhen den benötigten Arbeitsaufwand.

4.1.1 Mögliche Polygone

Zuerst wird ein Kreis mit Position $(0, 0)$ und Radius 1 benötigt. Mithilfe der Position vom Punkt und der Kamera wird der Kreis transformiert, dass die korrekten Pixel eingefärbt werden. In [Abbildung 7](#) ist die Konstruktion für mögliche Polygone gegeben.



(a) Dreieck



(b) Quadrat

Abbildung 7: Seitenlänge für Polygone, welche den Einheitskreis enthalten.

Das kleinste passende Dreieck ist ein gleichseitiges Dreieck. Ein mögliches Dreieck hat die Eckpunkte $(-\tan(60^\circ), -1)$, $(\tan(60^\circ), -1)$ und $(0, 2)$. Für das Dreieck werden drei Ecken und eine Fläche von $\frac{w \cdot h}{2} = \frac{\tan(60^\circ) \cdot 3}{2} = \tan(60^\circ) \cdot 3 \approx 5,2$ benötigt.

Das kleinste mögliche Viereck ist das Quadrat mit Seitenlänge 2. Um diesen anzuzeigen, wird das Quadrat entlang der Diagonalen in zwei Dreiecke unterteilt. Für die beiden Dreiecke werden sechs Ecken und eine Fläche von $a^2 = 2^2 = 4$ benötigt.

In Abbildung 8 ist ein Vergleich für eine Punktfolke gerendert mit unterschiedlichen Polygonen. Für Polygone mit mehr Ecken, wird der benötigte Bereich kleiner, es werden aber auch mehr Eckpunkte benötigt.

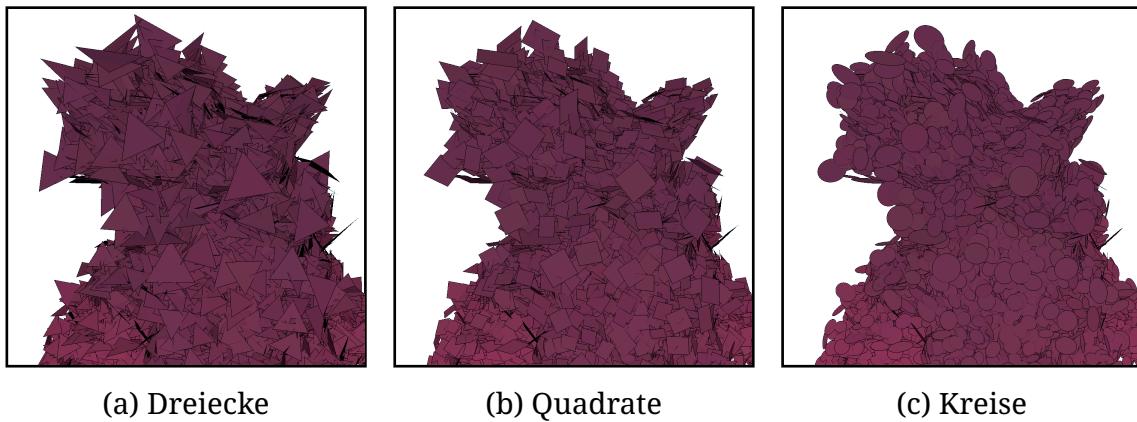


Abbildung 8: Eine Punktfolke mit einem Polygonen oder Kreis für jeden Punkt.

4.1.2 Anzeigen im dreidimensionalen Raum

Für jeden Punkt wird mit der Position p , Normalen n und Größe s und den Koordinaten (x_i, y_i) vom Eckpunkt i die zugehörige Position p_i im dreidimensionalen Raum bestimmt. Wie in Abbildung 9 werden zuerst zwei Vektoren bestimmt, welche paarweise zueinander und zur Normalen orthogonal sind. Mit den Vektoren wird dann die dreidimensionale Position vom Eckpunkt berechnet.

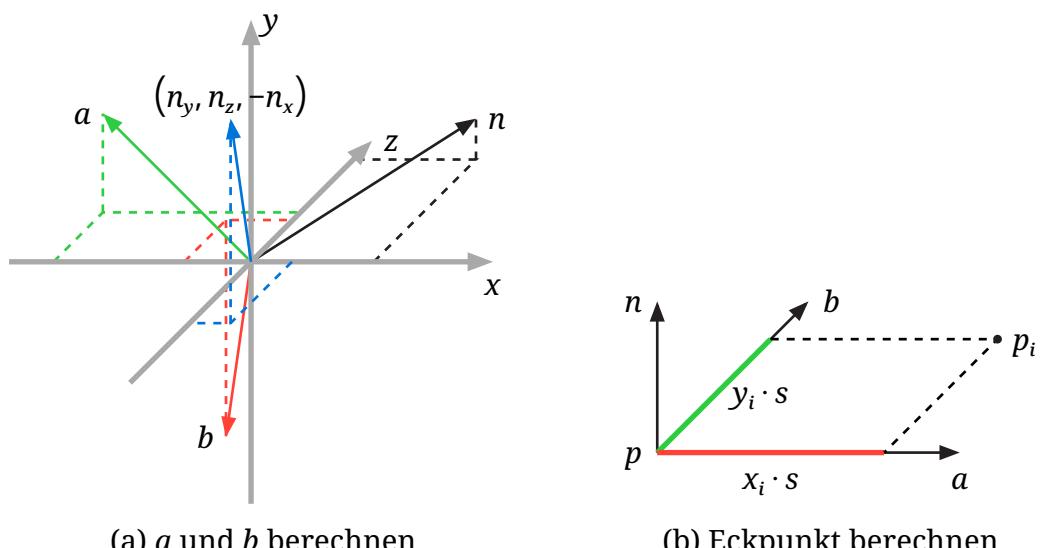


Abbildung 9: Transformation der Eckpunkte mit der Normalen.

Für den ersten Vektor a wird mit der Normalen $n = (n_x, n_y, n_z)$ das Kreuzprodukt $a = (n_x, n_y, n_z) \times (n_y, n_z, -n_x)$ bestimmt. Weil $\|n\| > 0$ ist, sind n und $(n_y, n_z, -n_x)$ unterschiedlich. a muss noch für die weiteren Berechnungen normalisiert werden. Für den zweiten Vektor b wird das Kreuzprodukt $b = n \times a$ bestimmt. Weil das Kreuzprodukt zweier Vektoren orthogonal zu beiden Vektoren ist, sind n , a und b paarweise orthogonal.

Die Vektoren a und b spannen dadurch eine Ebene auf, welche orthogonal zu n ist. Für den Eckpunkt vom Dreieck wird die Position $p_i = p + a \cdot x_i \cdot s + b \cdot y_i \cdot s$ berechnet.

4.2 Detailstufen

Je nach Scanner und Größe des abgetasteten Gebietes kann die Punktwolke unterschiedlich viele Punkte beinhalten. Durch Hardwarelimitierungen ist es nicht immer möglich, alle Punkte gleichzeitig anzuzeigen, während eine interaktive Wiedergabe gewährleistet ist.

Besonders für weit von der Kamera entfernte Punkte ist es nicht notwendig, alle Punkte genau anzuzeigen. Deshalb wird für weit entfernte Punkte eine vereinfachte Version berechnet und anstelle der originalen Punkte verwendet. Diese besteht aus weniger Punkten und benötigt dadurch weniger Ressourcen.

Für die gesamte Punktwolke wird ein Octree mit den Punkten erstellt. Am Anfang besteht der Octree aus einem Leaf-Knoten und die Punkte werden nacheinander zum Octree hinzugefügt. Dafür wird der Leaf-Knoten bestimmt, der zur Position vom Punkt gehört. Enthält der Leaf-Knoten weniger Punkte als die festgelegte Maximalanzahl, so wird der Punkt zum Knoten hinzugefügt. Wenn der Leaf-Knoten bereits voll ist, so wird dieser aufgeteilt. Der Leaf-Knoten wird mit einem Branch-Knoten mit acht Leaf-Knoten als Kinderknoten ersetzt und die Punkte vom Leaf-Knoten werden auf die Kinderknoten verteilt. Für die Unterteilung wird der Knoten entlang der x-, y- und z-Achse in der Mitte geteilt.

Alle Punkte gehören nach der Unterteilung zu einem Leaf-Knoten im Octree. Von den Leaf-Knoten aus bis zum Root-Knoten wird für jeden Branch-Knoten eine Punktwolke berechnet, welche als Vereinfachung der Punkte der zugehörigen Kinderknoten verwendet werden kann. In [Abbildung 10](#) sind die unterschiedlichen Stufen vom Octree mit zugehörigen Detailstufen visualisiert. Für jede höhere Stufe wird jeder Branch-Knoten durch seine Kinderknoten ersetzt, bis nur noch Leaf-Knoten angezeigt werden.

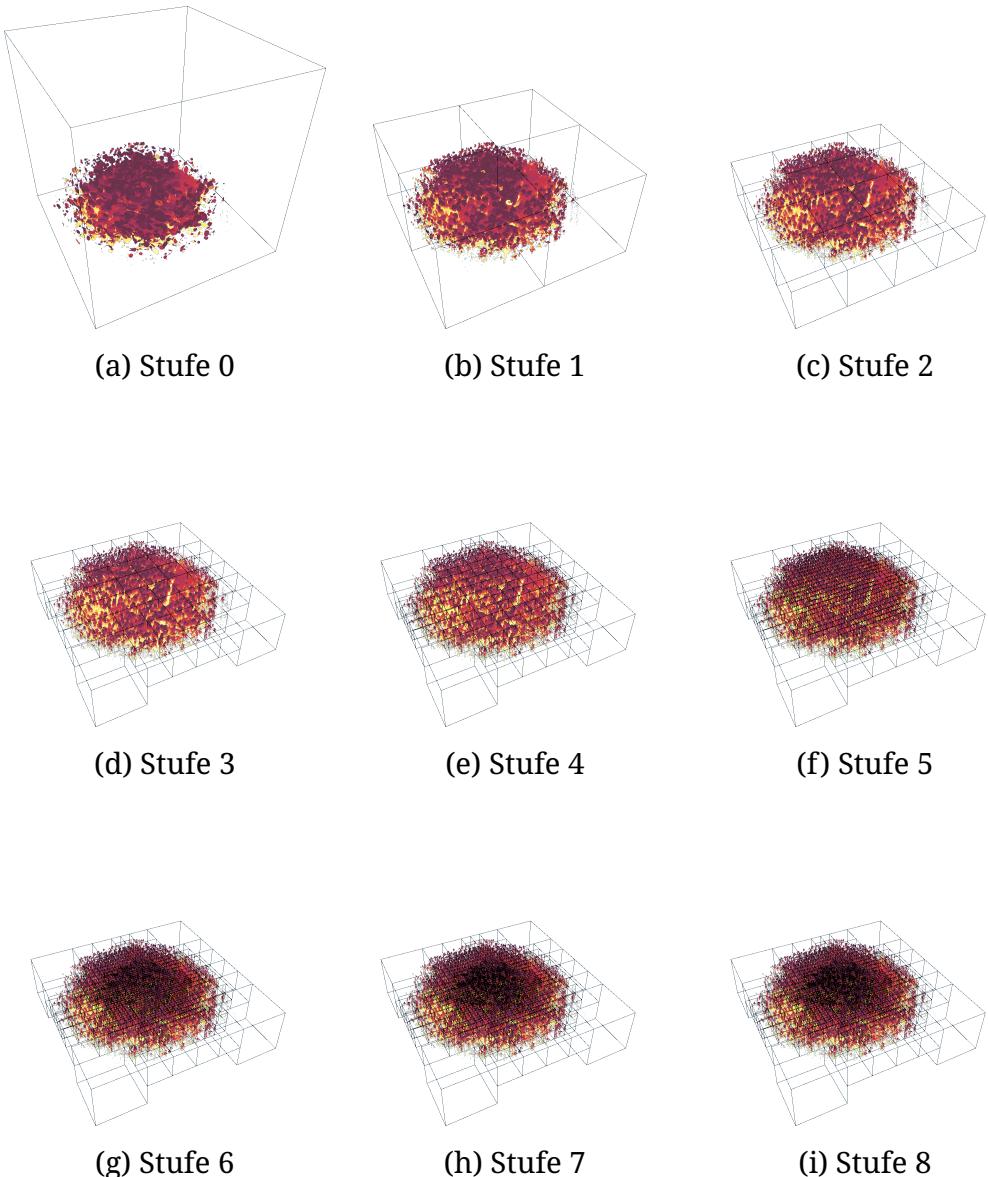


Abbildung 10: Unterschiedliche Detailstufen. Jeder Würfel enthält bis zu 32768 Punkte. In der höchsten Stufe werden alle Punkte im Datensatz angezeigt.

4.2.1 Berechnung der Detailstufen

Die Detailstufen werden wie bei „Fast Out-of-Core Octree Generation for Massive Point Clouds“ ([Schütz, Ohrhallinger, und Wimmer 2020](#)) von den untersten Branch-Knoten bis zum Root-Knoten berechnet. Dabei wird mit den Detailstufen der Kinderknoten die Detailstufe für den momentanen Knoten berechnet.

Dadurch haben zwar Berechnungen der größeren Detailstufen für Knoten näher an der Wurzel nur Zugriff auf bereits vereinfachte Daten, aber die Anzahl der Punkte, mit denen die Detailstufe berechnet wird, ist viel kleiner. Solange die Detailstufen eine gute Vereinfachung der ursprünglichen Punkte sind, kann so der Berechnungsaufwand stark verringert werden.

Für die Berechnung einer Detailstufe wird der Voxel, welcher zu dem Knoten gehört, in eine feste Anzahl von gleich großen Teilvoxeln unterteilt. Für jeden Teilvoxel werden zuerst alle Punkte aus den Kinderknoten bestimmt, welche im Teilvoxel liegen. Liegt kein Punkt im Teilvoxel, so wird dieser übersprungen. Aus den Punkten im Teilvoxel wird ein repräsentativer Punkt bestimmt. Dafür werden die Positionen, Normalen und Größen der Punkte gemittelt und die Eigenschaften von einem der Punkte übernommen. Die Detailstufe besteht aus allen repräsentativen Punkten für die Teilvoxel, welche nicht leer waren.

Bei der nächst größeren Detailstufe ist der Voxel vom Branch-Knoten doppelt so groß. Durch die feste Anzahl der Teilvoxel verdoppelt sich auch die Größe der Teilvoxel, wodurch die Punkte weiter vereinfacht werden.

4.3 Eye-Dome-Lighting

Um die Punktwolke anzuzeigen, werden die Punkte aus dem dreidimensionalen Raum auf den zweidimensionalen Monitor projiziert. Dabei gehen die Tiefeninformationen verloren. Mit der Rendertechnik Eye-Dome-Lighting werden die Kanten von Punkten hervorgehoben, bei denen die Tiefe sich stark ändert.

Beim Rendern von 3D-Szenen wird für jedes Pixel die momentane Tiefe vom Polygon an dieser Stelle gespeichert. Das wird benötigt, dass bei überlappenden Polygone das nähere Polygon an der Kamera angezeigt wird. Nachdem die Szene gerendert ist, wird mit den Tiefeninformationen für jedes Pixel der Unterschied zu den umliegenden Pixeln bestimmt. Ein Beispiel für die Tiefeninformationen ist in [Abbildung 11](#) gegeben. Je heller ein Pixel ist, desto weiter ist das zugehörige Polygon von der Kamera entfernt und Pixel ohne zugehöriges Polygon sind in Weiß.

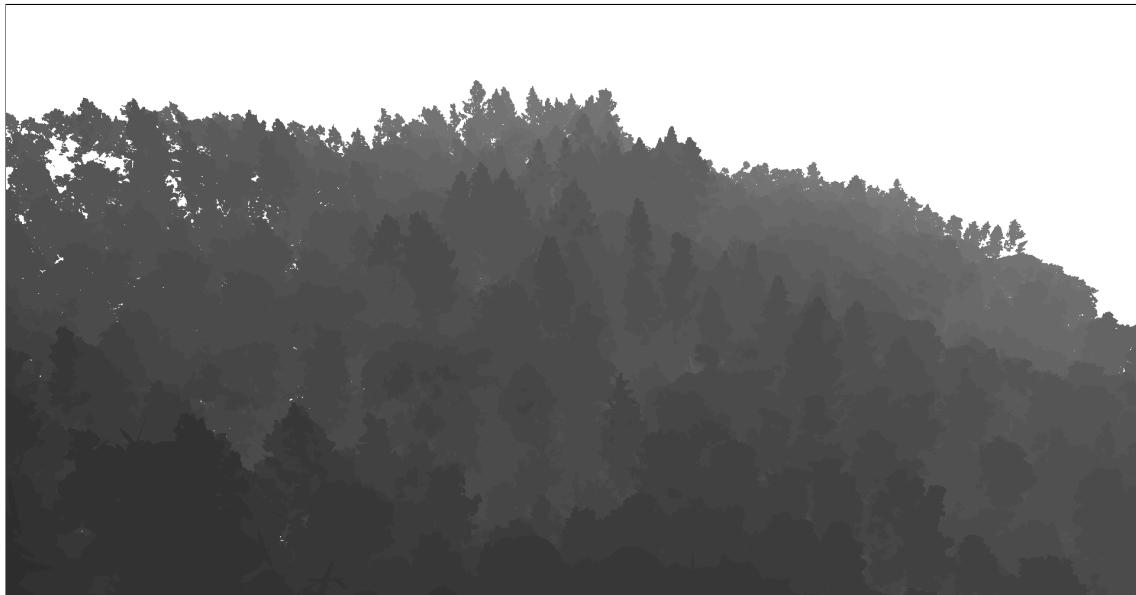


Abbildung 11: Tiefeninformationen nach dem Rendern der Szene.

Der Effekt entsteht dadurch, dass für jedes Pixel der maximale Unterschied in der Tiefe zu den umliegenden Pixeln bestimmt wird. Je größer der Unterschied, desto mehr wird das zugehörige Pixel verdunkelt. Eine Veranschaulichung ist in [Abbildung 12](#) gegeben. Die Punktwolke ist zusätzlich ohne Farbe gerendert, um den Effekt hervorzuheben.

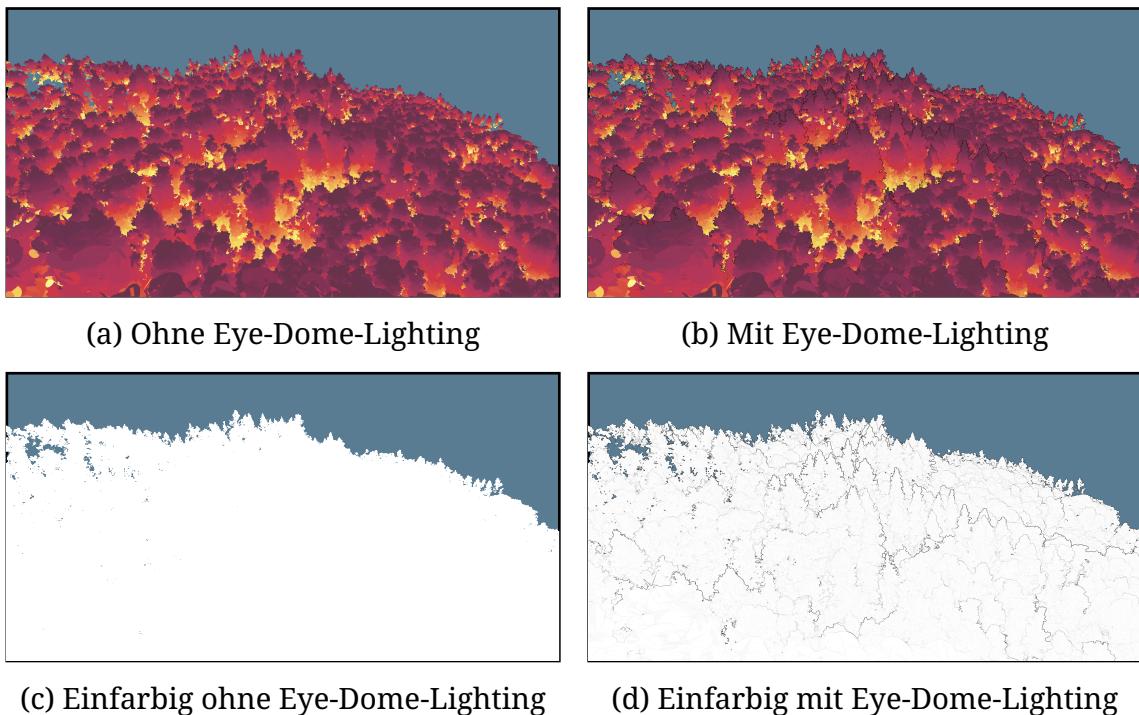


Abbildung 12: Waldgebiet mit und ohne Eye-Dome-Lighting.

Die Kanten sind immer nur einem Pixel breit, wodurch der optische Effekt von der Auflösung beeinflusst wird. Wenn die Auflösung sehr niedrig ist, werden die Kanten breiter und für eine hohe Auflösung dünner.

Die Berechnung wird für jedes Pixel durchgeführt, wodurch der Aufwand nur abhängig von der Anzahl der Pixel ist. Für eine Punktwolke mit sehr vielen Punkten bleibt dadurch der Aufwand für das Eye-Dome-Lighting gleich.

5 Triangulierung

5.1 Ziel

Das Ziel der Triangulierung ist eine Approximation der ursprünglichen Oberfläche von den gescannten Bäumen, welche weiterverarbeitet oder angezeigt werden kann. Die meisten Programme und Hardware sind auf das Anzeigen von Dreiecken spezialisiert und können diese effizienter als Punkte darstellen. Die Triangulierung wird dafür mit den Punkten von einem Bereich berechnet.

5.2 Ball-Pivoting Algorithmus

Beim Ball-Pivoting Algorithmus werden die Dreiecke der Oberfläche bestimmt, welche von einer Kugel mit Radius α (α -Kugel) erreicht werden können. Dabei berührt die Kugel die drei Eckpunkte vom Dreieck und alle anderen Punkte sind außerhalb der Kugel (Bernardini u. a. 1999).

In Abbildung 13 ist ein Beispiel in 2D gegeben. Dabei werden die Kanten zwischen zwei Punkten gesucht, dass der zugehörige Kreis keine weiteren Punkte enthält. Für die äußeren Punkte in Schwarz wird eine Oberfläche gefunden. Für den inneren Punkt in Rot kann kein Nachbar gefunden werden, weil alle zugehörigen Kreise weitere Punkte enthalten würden.

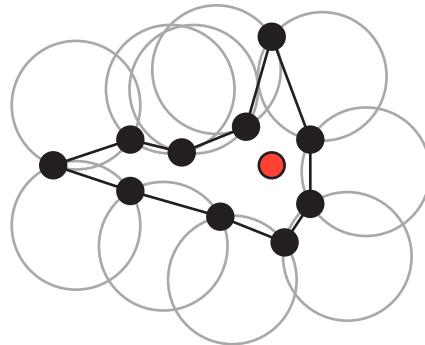


Abbildung 13: Ball-Pivoting Algorithmus in 2D.

Die gefundenen Dreiecke bilden eine äußere Hülle um die Punkte. Je kleiner α ist, desto genauer ist die Hülle um die Punkte und Details werden besser wiedergegeben. Dafür werden mehr Dreiecke benötigt und größere Lücken in den Punkten sind auch in der Hülle vorhanden.

5.2.1 α -Kugel für ein Dreieck

Für ein Dreieck (p_1, p_2, p_3) wird die Position der zugehörigen α -Kugel benötigt. Dafür wird zuerst das Zentrum c vom Umkreis vom Dreieck bestimmt. Von diesem sind alle Eckpunkte gleich weit entfernt. Ist der Abstand d_c vom Zentrum zu den Ecken größer als α , so gibt es keine zugehörige α -Kugel. Für Abstände kleiner gleich α ist das Zentrum der Kugel $d = \sqrt{\alpha^2 - d_c^2}$ vom Zentrum vom Umkreis ent-

fernt. Der Vektor $o = (p_2 - p_1) \times (p_3 - p_1)$ ist orthogonal zum Dreieck, womit die Position vom Zentrum der α -Kugel mit $c + d \cdot \frac{o}{\|o\|}$ berechnet werden kann.

Durch die Berechnung von o ist die Reihenfolge der Punkte relevant. Vertauschen von zwei Punkten berechnet die α -Kugel auf der anderen Seite des Dreiecks.

5.3 Ablauf

5.3.1 KD-Baum berechnen

Zuerst wird ein KD-Baum für die Punkte im Segment berechnet. Der KD-Baum ermöglicht die effiziente Bestimmung von den nächsten Punkten für eine beliebige Position. Dabei werden nur die Punkte bestimmt, welche näher als ein Maximalabstand von der Position entfernt sind. Die Konstruktion und Verwendung vom KD-Baum wird in [Abschnitt 10.2](#) erklärt.

Mit dem KD-Baum kann auch überprüft werden, ob in einer α -Kugel keine weiteren Punkte liegen. Dafür wird der erste Punkt gesucht, der in der Kugel liegt. Wenn kein Punkt gefunden wird, ist die Kugel leer.

5.3.2 Startdreieck bestimmen

Als Anfang wird ein Dreieck mit zugehöriger α -Kugel benötigt, dass keine weiteren Punkte innerhalb der Kugel liegen. Dafür werden alle Punkte iteriert.

Für den momentanen Punkt werden die umliegenden Punkte mit einem Abstand von 2α oder weniger bestimmt. Für weiter entfernte Punkte gibt es keine α -Kugel, welche beide Punkte berühren würde.

Mit dem momentanen Punkt und alle möglichen Kombination von zwei Punkten aus den umliegenden Punkten wird ein Dreieck gebildet. Für das Dreieck wird probiert die zwei möglichen α -Kugeln zu bestimmen, welche zum Dreieck gehören.

Wenn ein Dreieck mit zugehöriger α -Kugel gefunden wurde, welche keine weiteren Punkte enthält, kann dieses Dreieck als Startdreieck verwendet werden. Das Dreieck wird zur Triangulierung hinzugefügt und die drei zugehörigen Kanten bilden die momentanen äußeren Kanten, von denen aus die Triangulierung berechnet wird.

5.3.3 Triangulierten Bereich erweitern

Solange es noch eine äußere Kante (p_1, p_2) gibt, kann die Triangulierung erweitert werden. Für die Kante ist bereits ein Dreieck und die zugehörige α -Kugel mit Zentrum c bekannt. Die Kante dient als Pivot, um welches die α -Kugel gerollt wird. Der erste Punkt p , welcher von der Kugel berührt wird, bildet mit p_1 und p_2 ein neues Dreieck.

In [Abbildung 14](#) ist ein Beispiel für eine Erweiterung in 2D gegeben. Im zweidimensionalen werden Kanten gesucht und Punkte werden als Pivot verwendet. Die vorherige Kante und der momentane Pivot-Punkt sind in Schwarz. Der α -Kreis rollt entlang der markierten Richtung und berührt zuerst den grünen Punkt. Die weiteren Kandidaten sind in Rot und liegen weiter entlang der Rotation.

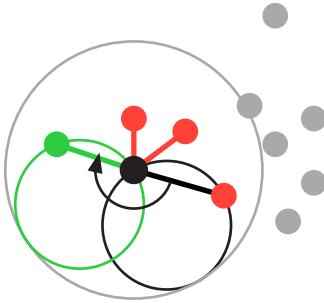


Abbildung 14: Erweiterung der gefundenen Oberfläche in 2D.

Mögliche Kandidaten bestimmen

Um den ersten Punkt p zu finden, werden zuerst alle möglichen Punkte bestimmt, welche von der Kugel bei der kompletten Rotation berührt werden können. Dafür wird der Mittelpunkt mp der Kante und der Abstand d berechnet.

$$mp = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad d = \|p_1 - mp\| = \|p_2 - mp\|$$

Der Abstand zwischen dem Zentrum der Kugel und den Endpunkten von der Kante ist immer α , dadurch ist der Abstand vom Zentrum zum Mittelpunkt der Kante $d_c = \sqrt{\alpha^2 - d^2}$. In [Abbildung 15](#) ist die Konstruktion veranschaulicht.

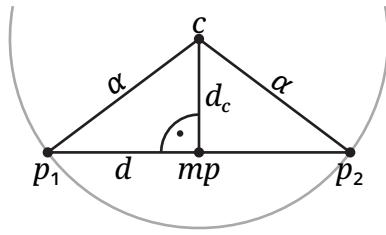


Abbildung 15: Abstand vom Zentrum der α -Kugel zum Mittelpunkt der Kante.

Die möglichen Punkte sind vom Zentrum der Kugel c maximal α entfernt und c ist vom Mittelpunkt mp genau d_c weit entfernt. Deshalb werden mit dem KD-Baum die Punkte in der Kugel mit Zentrum mp und Radius $\alpha + d_c$ als mögliche Kandidaten bestimmt.

Besten Kandidaten bestimmen

Für jeden Kandidaten p wird berechnet, wie weit die Kugel um die Kante gerollt werden muss, bis die Kugel den Kandidaten berührt. Dafür wird zuerst das Zentrum c_p der α -Kugel bestimmt, welche p_1 , p_2 und p berührt. Das Zentrum wird dabei wie in [Abbildung 16](#) berechnet, dass die Kugel auf der korrekten Seite vom potenziellen Dreieck liegt. p kann so liegen, dass es keine zugehörige α -Kugel gibt, in diesem Fall wird p nicht weiter betrachtet. Für die restlichen Kandidaten wird der Winkel φ berechnet, wie weit um die Kante die Kugel gerollt wurde.

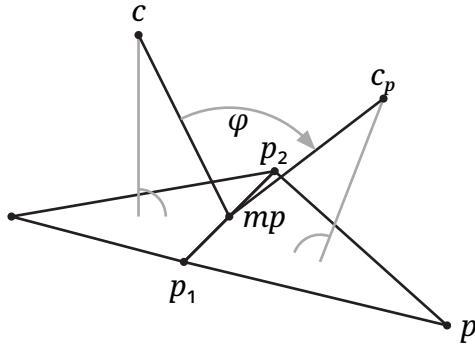


Abbildung 16: Berechnung von Zentrum der α -Kugel und zugehöriger Winkel für einen Kandidaten.

Mit mp , c und c_p wird der Winkel φ bestimmt. Dafür werden die normalisierten Vektoren a und b berechnet.

$$a = \frac{c - mp}{\|c - mp\|} \quad b = \frac{c_p - mp}{\|c_p - mp\|}$$

Der Kosinus von φ ist dabei das Skalarprodukt $s = a \cdot b$. Zusätzlich wird mit dem Kreuzprodukt $k = a \times b$ die Richtung r bestimmt, um die Winkel mit gleichen Kosinus zu unterscheiden.

$$k = a \times b \quad r = k \cdot (p_2 - p_1) \quad \varphi = \begin{cases} \arccos(s) & \text{falls } r \geq 0 \\ \tau - \arccos(s) & \text{falls } r < 0 \end{cases}$$

Von allen Kandidaten wird der Punkt p_3 ausgewählt, für den φ am kleinsten ist. Wenn $p_1 = p_3$ oder $p_2 = p_3$, dann gibt es keinen dritten Punkt, um die Triangulierung zu erweitern und kein weiteres Dreieck wird für die Kante hinzugefügt.

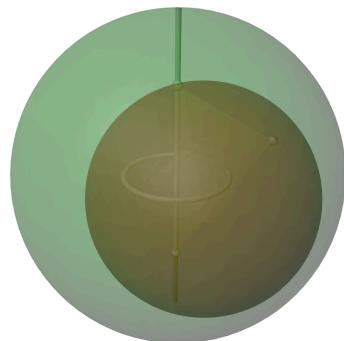
Es muss nicht kontrolliert werden, ob ein Punkt in der α -Kugel von (p_1, p_2, p_3) liegt, weil diese immer leer ist. Würde ein weiterer Punkt in der Kugel liegen, so würde der zugehörige Winkel φ von diesem Punkt kleiner sein, weil der Punkt beim Rollen um die Kante früher von der Kugel berührt wird. Weil p_3 aber zum kleinsten Winkel gehört, ist die zugehörige α -Kugel immer leer. Dies gilt aber nur, wenn die Kugel vor dem Rollen bereits leer war.

Triangulierung erweitern

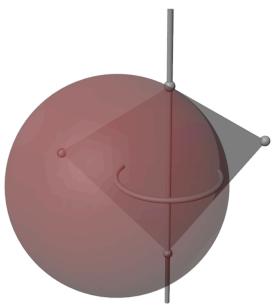
Das neu gefundene Dreieck mit den Eckpunkten (p_1, p_2, p_3) wird zur Triangulierung hinzugefügt. Die Kante (p_1, p_2) wird von den äußeren Kanten entfernt, dafür werden die neuen Kanten (p_1, p_3) und (p_3, p_2) hinzugefügt. Wenn eine der neuen Kante in den äußeren Kanten bereits vorhanden ist, wird diese nicht hinzugefügt, sondern von den äußeren Kanten entfernt, weil das zugehörige zweite Dreieck auf der anderen Seite der Kante bereits gefunden wurde. Eine Veranschaulichung ist in Abbildung 17 gegeben.



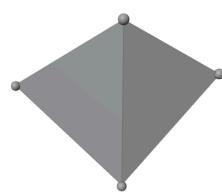
(a) Kante mit zugehörigem Dreieck, α -Kugel und Ring mit Radius d_c



(b) Kugel mit Radius $\alpha + d_c$, welche alle Kandidaten enthält



(c) Erster Punkt, welcher entlang der Rotation die Kugel berührt



(d) Triangulierung, mit dem neuen Dreieck hinzugefügt

Abbildung 17: Erweiterung der Triangulierung in 3D.

5.3.4 Komplettes Segment triangulieren

Solange es noch äußere Kanten gibt, kann von diesen aus die Triangulierung erweitert werden. Dabei muss beachtet werden, dass durch Ungenauigkeiten bei der Berechnung eine Kante mehrfach gefunden werden kann. Um eine erneute Triangulierung von bereits triangulierten Bereichen zu verhindern, werden alle inneren Kanten gespeichert und neue Kanten nur zu den äußeren Kanten hinzugefügt, wenn diese noch nicht in den inneren Kanten vorhanden sind.

Wenn es keine weiteren äußeren Kanten gibt, muss ein neues Startdreieck gefunden werden. Dabei werden nur die Punkte in Betracht gezogen, welche zu noch keinem Dreieck gehören. Wenn kein Startdreieck gefunden werden kann, ist das Segment vollständig trianguliert.

5.4 Vorauswahl

Vor der Triangulierung wird mit einem Mindestabstand die Menge der Punkte berechnet, welche betrachtet werden. Dafür wird eine Teilmenge der Punkte bestimmt, dass die Punkte paarweise mindestens den Mindestabstand voneinander entfernt sind.

Für die Berechnung wird ein Greedy-Algorithmus verwendet. Am Anfang werden alle Punkte zur Teilmenge hinzugefügt und danach werden die Punkte in der Teilmenge iteriert. Für jeden Punkt wird mit dem KD-Baum die Punkte in der Nachbarschaft bestimmt, welche näher als den Mindestabstand zum momentanen Punkt liegen. Die nahen Punkte werden aus der Teilmenge entfernt und der nächste Punkt in der Teilmenge wird betrachtet.

5.5 Auswahl von α

In Abbildung 18 wurde die Triangulation für die gleiche Punktwolke mit unterschiedlichen Werten für α berechnet. Im oberen Bild sind die Dreiecke ausgefüllt und im unteren Bild umrandet. Mit einem größerem α wird das Ergebnis immer weiter vereinfacht. Bei einem kleinen Wert für α entstehen Lücken in der Triangulierung, wenn die Punkte weiter als 2α voneinander entfernt sind.

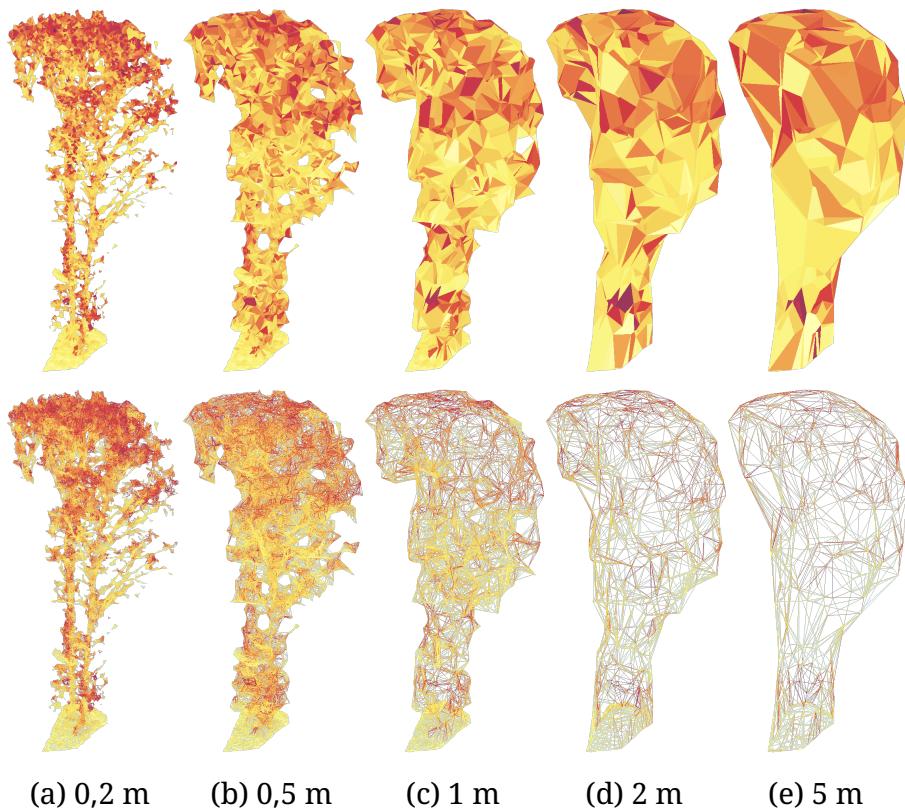


Abbildung 18: Triangulation für unterschiedliche α .

Der Bereich für die Suche vom nächsten Kandidaten für die Erweiterung von der Triangulierung ist abhängig von α . Dadurch steigt der Berechnungsaufwand mit größerem α , weil mehr Dreiecke und jeweils mehr Kandidaten berechnet werden müssen.

Im Idealfall wird α so klein gewählt, dass keine gewünschten Details verloren gehen und so groß, dass keine Lücken in der Triangulierung entstehen.

6 Analyse von Bäumen

Die charakteristischen Eigenschaften werden für jeden Baum einzeln berechnet. Für jeden Punkt im Baum wird zuerst die relative Höhe, lokale Krümmung und zugehörige horizontale Ausdehnung bestimmt. Mit diesen Daten wird dann eine Unterteilung in Boden, Stamm und Krone durchgeführt. Ein Beispiel für die Ergebnisse sind in [Abbildung 19](#) zu sehen.

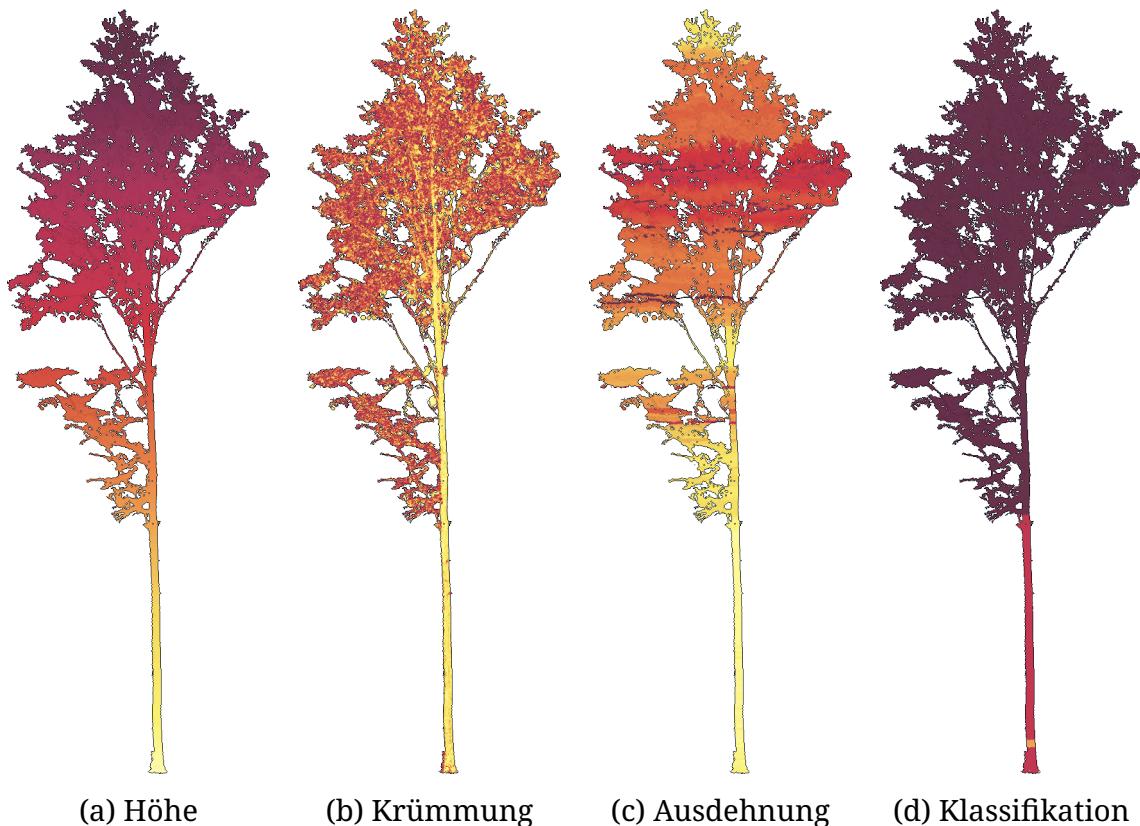


Abbildung 19: Baum eingefärbt mit den berechneten Eigenschaften.

6.1 Eingabedaten

Die Punkte sind als Liste der Länge n gegeben. Für den Punkt $i \in \mathbb{N}_0^{n-1}$ ist nur die globale Position $p_i = (p_{ix}, p_{iy}, p_{iz})$ bekannt. Die Punkte sind dabei ungeordnet, wodurch aufeinanderfolgende Punkte in der Liste weit voneinander entfernte Positionen haben können.

6.2 Punkteigenschaften

Um einen Punkt i zu analysieren, wird die zugehörige Nachbarschaft N_i benötigt. Die Nachbarschaft enthält dabei die nächsten Punkte nach Abstand sortiert. Dafür wird mit den Punkten ein KD-Baum erstellt. Mit diesem können effizient für eine Position p_i und ein beliebiges $k \in \mathbb{N}$ die k -nächsten Punkte bestimmt werden. Die Konstruktion und Verwendung vom KD-Baum wird in [Abschnitt 10.2](#) erklärt. In

der Nachbarschaft ist dann N_0 der momentane Punkt i , N_1 der nächste Punkt und N_{k-1} der $k - 1$ nächste Punkt.

6.2.1 Relative Höhe

Für jeden Punkt wird die relative Höhe im Segment bestimmt. Dafür wird zuerst mit allen Positionen die Mindesthöhe h_{\min} und Maximalhöhe h_{\max} bestimmt.

$$h_{\min} = \min_{i \in N_0^{n-1}} p_{iy} \quad h_{\max} = \max_{i \in N_0^{n-1}} p_{iy}$$

Mit der Mindest- und Maximalhöhe kann für den Punkt i die relative Höhe h_i bestimmt werden.

$$h_i = \frac{p_{iy} - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}}$$

Die relative Höhe liegt immer im Bereich $[0; 1]$ und wird größer, je höher der Punkt liegt.

6.2.2 Krümmung

Die Krümmung der ursprünglichen abgetasteten Oberfläche wird für jeden Punkt geschätzt. Dafür wird für den Punkt i die Verteilung der umliegenden Punkte N_i betrachtet. Zuerst wird für die Nachbarschaft der geometrische Schwerpunkt s_i bestimmt.

$$s_i = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j \in N_i} p_j$$

Mit dem Schwerpunkte kann die Kovarianzmatrix C_i bestimmt werden.

$$C_i = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j \in N_i} \begin{pmatrix} (p_{jx} - s_{ix})^2 & (p_{jx} - s_{ix}) \cdot (p_{jy} - s_{iy}) & (p_{jx} - s_{ix}) \cdot (p_{jz} - s_{iz}) \\ (p_{jy} - s_{iy}) \cdot (p_{jx} - s_{ix}) & (p_{jy} - s_{iy})^2 & (p_{jy} - s_{iy}) \cdot (p_{jz} - s_{iz}) \\ (p_{jz} - s_{iz}) \cdot (p_{jx} - s_{ix}) & (p_{jz} - s_{iz}) \cdot (p_{jy} - s_{iy}) & (p_{jz} - s_{iz})^2 \end{pmatrix}$$

Ohne die Verschiebung um s_i würde die globale Position der Punkte die Kovarianzmatrix beeinflussen. Von der Kovarianzmatrix werden die Eigenwerte und zugehörige Eigenvektoren bestimmt.

Die normierten Eigenvektoren $v_{i\alpha}$ mit $\alpha \in \{0, 1, 2\}$ bilden eine Orthonormalbasis und der zugehörige Eigenwert $\lambda_{i\alpha}$ für $v_{i\alpha}$ ist die Ausdehnung der Punkte entlang des Basisvektors. Der kleinste Eigenwert gehört zur Dimension mit der geringsten Ausdehnung. Je kleiner der kleinste Eigenwert, desto näher liegen die Punkte in der Nachbarschaft an der Ebene aufgespannt durch die anderen beiden Eigenvektoren. Ein Beispiel für Eigenvektoren im zweidimensionalen ist in [Abbildung 20](#) gegeben. Die Länge der Vektoren ist anhängig vom zugehörigen Eigenwert und die Ausdehnung der Punkte ist am geringsten Entlang des kleinsten Eigenvektors.

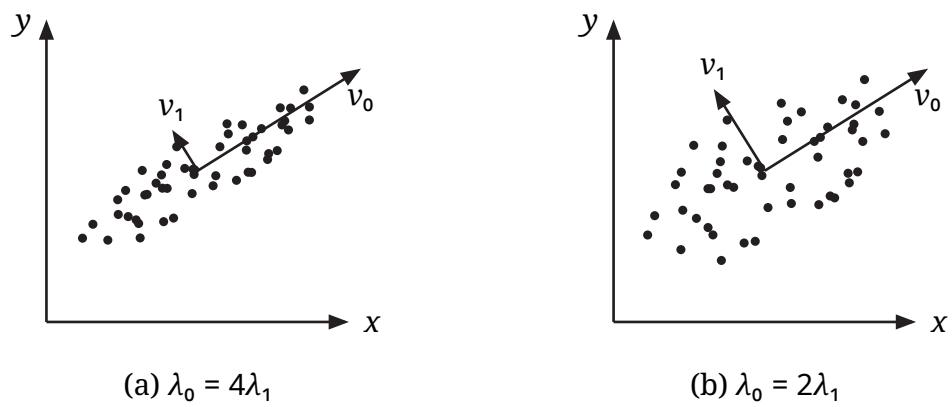


Abbildung 20: Eigenwerte und zugehörige Eigenvektoren.

Mit den Eigenwerten $\lambda_{i\alpha}$ absteigend nach größer sortiert wird die Krümmung c_i berechnet.

$$c_i = \frac{3\lambda_{i2}}{\lambda_{i0} + \lambda_{i1} + \lambda_{i2}}$$

c_i liegt dabei im abgeschlossenen Bereich $[0; 1]$, weil $0 \leq \lambda_{i0} \leq \lambda_{i1} \leq \lambda_{i2}$ ist.

6.2.3 Eigenschaften für die Visualisierung

Für die Visualisierung wird die Position, Orientierung und Größe von jedem Punkt benötigt. Die Position ist in den Eingabedaten gegeben und die anderen Eigenschaften werden mit der lokalen Umgebung vom Punkt berechnet. In Abbildung 21 ist ein Beispiel gegeben. Die dichteren Punkte beim Stamm sind kleiner als die umliegenden Punkte und die Orientierung ändert sich beim Übergang vom Stamm zum Boden.

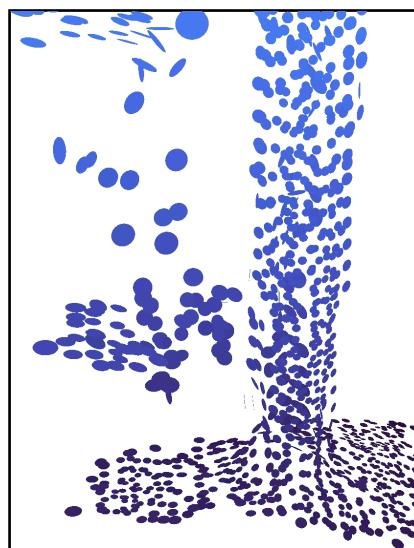


Abbildung 21: Ausschnitt von einer Punktfolge.

Für die Orientierung wird die Normale bestimmt, welche orthogonal zur geschätzten zugehörigen Oberfläche vom Punkt ist. Dafür werden wieder die Eigenvektoren der Kovarianzmatrix verwendet. Der Eigenvektor, welcher zum kleinsten Eigenwert gehört, ist dabei orthogonal zur geschätzten Ebene mit der größten Ausdehnung.

Für die Punktgröße wird der durchschnittliche Abstand zu den umliegenden Punkten bestimmt. Dadurch werden die Punkte in Bereichen mit hoher Punktdichte kleiner.

6.3 Baumeigenschaften

Für den Baum wird die Gesamthöhe und jeweils die Höhe und den Durchmesser vom Stamm und der Krone gesucht. Dafür werden die Punkte in Scheiben unterteilt, diese dem Boden, Stamm oder Krone zugeordnet und dann wird mit den Scheiben die gesuchten Werte berechnet. Die einstellbaren Parameter dafür sind in [Tabelle 1](#) gelistet.

Name	Funktion
w	Breite von einer Scheibe
h_g	Maximale Suchhöhe für den Boden
s_g	Skalierungsfaktor für die Mindestfläche vom Boden
h_t	Höhe für die Berechnung vom Stammdurchmesser
r_t	Bereich für die Berechnung vom Stammdurchmesser
d_c	Differenz zwischen den Stammdurchmesser und dem Mindestdurchmesser der Krone

Tabelle 1: Parameter für die Klassifikation.

6.3.1 Unterteilung in Scheiben

Zuerst werden die Punkte in gleich breite Scheiben unterteilt. Dafür wird mit der Breite w , h_{\min} und h_{\max} die Anzahl der benötigten Scheiben c und für jeden Punkt i der Index s_i der zugehörigen Scheibe berechnet.

$$c = \left\lceil \frac{h_{\max} - h_{\min}}{w} \right\rceil + 1 \quad s_i = \left\lfloor \frac{p_{iy} - h_{\min}}{w} \right\rfloor$$

Für jede Scheibe wird der horizontale konvexe Bereich bestimmt, der alle Punkte in der Scheibe beinhaltet. Dafür werden die Methoden wie bei der Segmentierung in [Abschnitt 3.2](#) verwendet. Mit den Bereichen wird die Fläche bestimmt, welche von den Punkten in der Scheibe belegt wird. In [Abbildung 22](#) ist ein Beispiel gegeben.

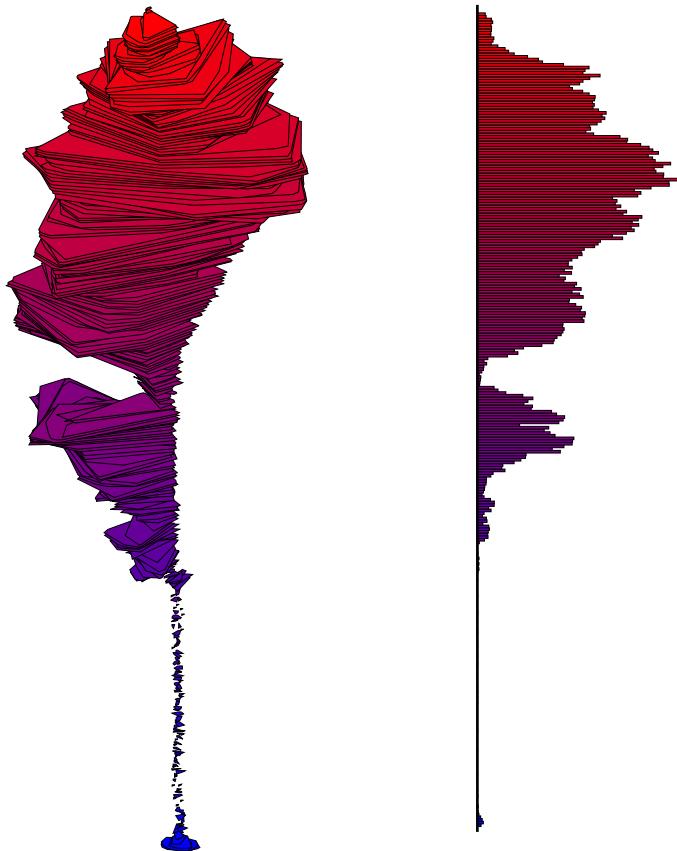


Abbildung 22: Baum in Scheiben unterteilt mit der zugehörigen Fläche für jede Scheibe.

6.3.2 Bodenhöhe

Mit den Flächen wird zuerst die kleinste Fläche a_{\min} und die größte Fläche a_{\max} bestimmt.

Danach wird die Bodenhöhe g gesucht. Dafür werden die Suchhöhe h_g und der Skalierungsfaktor s_g verwendet. Von unten wird die erste Scheibe gesucht, welche eine größere Fläche als $s_g \cdot a_{\min}$ hat. Ist die Scheibe höher als h_g , wird die Höhe der untersten Scheibe als Boden verwendet. Ist die Scheibe niedriger als h_g , wird die nächste Scheibe gesucht, dessen Fläche kleiner als $s_g \cdot a_{\min}$ ist, und die Höhe von dieser Scheibe wird als g verwendet.

6.3.3 Stammdurchmesser

Mit der berechneten Bodenhöhe g , der Messhöhe h_t und dem Bereich r_t wird der Stammdurchmesser d_t bestimmt. Zuerst werden alle Punkte bestimmt, bei denen die Höhe im Bereich $[g + h_t - \frac{r_t}{2}, g + h_t + \frac{r_t}{2}]$ liegt. Mit dem MSAC-Algorithmus² wird der Kreis gesucht, welcher am besten die Punkte beschreibt.

Beim MSAC-Algorithmus werden wiederholt genug zufällige Datenpunkte ausgewählt, dass aus diesen der gewünschte Wert eindeutig berechnet werden kann.

²m-estimator sample consensus

Danach wird für jeden Datenpunkt die Abweichung zum Wert bestimmt. Die Abweichung wird auf einen Maximalwert beschränkt, um den Einfluss von weit entfernten Datenpunkten zu verringern. Die Summe von allen Abweichungen ist der Fehler für den momentanen Wert. Der Wert mit dem geringsten Fehler wird als das finale Ergebnis verwendet ([Torr und Zisserman 2000](#)).

Am Anfang wird als Durchmesser der Standardwert 0,5 m und als kleinster Fehler unendlich verwendet. Dann werden wiederholt drei zufällige Punkte ausgewählt, mit denen das Zentrum und der Durchmesser vom zugehörige Kreis eindeutig berechnet werden kann. Der summierte Abstand von allen Punkten zum Kreis wird als Fehler berechnet. Um den Effekt von Datenpunkten zu verringern, welche nicht zum Stamm gehören wird die Abweichung auf 0,2 m beschränkt. Ist der momentane Fehler kleiner als der bisher kleinste Fehler, wird der Durchmesser als neuen besten Wert verwendet und der kleinste Fehler wird aktualisiert.

Nach allen Iterationen wird der Durchmesser vom besten Kreis als der geschätzte Stammdurchmesser verwendet.

6.3.4 Baumhöhe

Mit dem Stammdurchmesser d_t und der Mindestdifferenz d_c wird die Höhe vom Anfang der Krone bestimmt. Dafür wird die Scheibe gesucht, dessen Durchmesser d_c größer als $d_t + d_c$ ist. Die zugehörige geschätzte Mindestfläche a_m kann abhängig vom Durchmesser geschätzt werden.

$$a_m = \pi \cdot \left(\frac{d_t + d_c}{2} \right)^2$$

Danach wird die erste Scheibe höher als der Boden gesucht, dessen Fläche größer als a_m ist und die zugehörige Höhe h_c als Anfang der Krone verwendet. Der Baum geht vom Boden bis zur höchsten Scheibe, der Stamm vom Boden bis h_c und die Krone von h_c bis zur höchsten Scheibe.

6.3.5 Durchmesser von der Baumkrone

Für den Durchmesser von der Baumkrone wird für alle Scheiben in der Krone die Scheibe mit der größten Fläche a_c gesucht. Mit der Fläche wird der zugehörige Durchmesser d_c geschätzt.

$$d_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{a_c}{\pi}}$$

7 Implementierung

7.1 Technik

Das Softwareprojekt ist auf [GitHub](#)³ verfügbar. Als Programmiersprache wird Rust und als Grafikkartenschnittstelle WebGPU verwendet. Rust ist eine performante Programmiersprache mit einfacher Integration für WebGPU. WebGPU bildet eine Abstraktionsebene über der nativen Grafikkartenschnittstelle, dadurch ist die Implementierung unabhängig vom Betriebssystem. Alle verwendeten Bibliotheken sind in [Tabelle 2](#) gelistet.

Name	Version	Funktionalität
nalgebra	0.32.4	Lineare Algebra
pollster	0.3	Auf asynchrone Berechnungen warten
rfd	0.14	Dialogfenster zum Öffnen und Speichern von Dateien
crossbeam	0.8	Synchronisierung zwischen Threads
log	0.4	Logs erzeugen
env_logger	0.11	Wiedergabe von Logs
image	0.24	Laden und Speichern von Bildern
wgpu	0.19	WebGPU Implementierung
winit	0.29	Fenstermanagement
bytemuck	1.14	Konversation von Daten zu Bytes
serde	1.0	Serialisierung von Datentypen
serde_json	1.0	Serialisierung als JSON
rand	0.8	Generierung von Zufallszahlen
num_cpus	1.15	Anzahl von Prozessorkernen bestimmen
laz	0.8	Dekomprimieren von LASzip Dateien
thiserror	1.0	Fehlermanagement
tempfile	3.8.1	Temporäre Dateien erstellen
rayon	1.8.0	Multithreading
termsize	0.1	Größe vom Terminal bestimmen
egui	0.26	Benutzeroberfläche
egui-winit	0.26	Systemereignisse zum Interface weiterleiten
egui-wgpu	0.26	Interface rendern
clap	4.4	Kommandozeilenargumente verarbeiten
voronator	0.2.1	Voronoi-Diagramm bestimmen
cfg-if	1.0.0	Konditionales Kompilieren von Quelltext
static_assertions	1.1.0	Systemeigenschaften überprüfen
colored	2.1.0	Farben für Text im Terminal

Tabelle 2: Benutzte Bibliotheken

³<https://github.com/antonWetzel/treee>

Als Eingabe werden Datensätze im LASzip-Format verwendet. Weitere Formate können einfach eingebunden werden, solange eine Rust-Bibliothek existiert, welche das Format einlesen kann.

7.2 Benutzung

7.2.1 Installation

Für den Import und die Visualisierung wird das kompilierte Programm `treee` benötigt. Dieses kann mit dem Quelltext selber kompiliert werden oder bereits kompilierte Versionen können vom [GitHub-Release](#)⁴ heruntergeladen werden. Die Schritte zum selber kompilieren sind im [Readme](#)⁵ verfügbar.

7.2.2 Ausführen

In [Tabelle 3](#) sind die Befehle gelistet, um den Importer und die Visualisierung zu starten. Um `treee` von der Befehlszeile auszuführen, muss das Programm im PATH verfügbar sein oder anstelle von `treee` muss der absolute Pfad vom Programm verwendet werden.

Befehl	Funktion
<code>treee</code>	Interaktive Umgebung starten
<code>treee importer</code>	Importer starten
<code>treee help importer</code>	Verfügbare Optionen für den Importer anzeigen
<code>treee viewer</code>	Visualisierung starten

Tabelle 3: Mögliche Befehle für das Programm.

Wenn das Programm ohne Argumente oder außerhalb vom Terminal gestartet wird, kann die gewünschte Funktion interaktiv ausgewählt werden. Für den Import können weitere Optionen mit der Befehlszeile angegeben werden, um den Ablauf an den Datensatz anzupassen.

7.2.3 Import

Für den Import wird der Datensatz und der Ordner zum Speichern der Ergebnisse benötigt. Beide können in der Befehlszeile angegeben werden oder über ein Dialogfenster ausgewählt werden. Alle weiteren Optionen mit der zugehörigen Funktion sind in [Tabelle 4](#) gelistet. Am Ende vom Import wird im Ordner für die Ergebnisse die `project.json` Datei und zugehörige Daten abgespeichert, welche von der Visualisierung geöffnet werden können.

⁴<https://github.com/antonWetzel/treee/releases>

⁵<https://github.com/antonWetzel/treee?tab=readme-ov-file#treee>

Flag	Standardwert	Funktion
--max-threads	unbegrenzt	Maximale Anzahl an parallelen Threads
--min-segment-size	100	Mindestanzahl von Punkten für ein Segment
--segmenting-slice-width	1 m	Breite der horizontalen Scheiben für die Segmentierung
--segmenting-max-distance	1 m	Mindestabstand zwischen Bereichen für die Segmentierung
--calculations-slice-width	0,1 m	Breite der horizontalen Scheiben für die Analyse von einem Baum
--ground-min-area-scale	1,5	Mindestgröße vom Boden im Vergleich zu der kleinsten Scheibe
--ground-max-search-height	1 m	Maximale Suchhöhe für den Anfang vom Boden
--trunk-diameter-height	1,3 m	Höhe für den Durchmesser vom Stamm
--trunk-diameter-range	0,2 m	Bereich für den Durchmesser vom Stamm
--crown-diameter-difference	1 m	Unterschied vom Durchmesser zwischen dem Stamm und dem Anfang von der Baumkrone
--neighbors-count	31	Maximale Punktanzahl in der Nachbarschaft für die Analyse von Punkten
--neighbors-max-distance	1 m	Maximale Distanz vom Punkt zu den Punkten in der Nachbarschaft
--lod-size-scale	0,95	Skalierungsfaktor für die Fläche der kombinierten Punkte für die Detailstufen
--proj-location	+proj=utm +ellps=GRS80 +zone=32	Region für die geographischen Koordinaten

Tabelle 4: Optionen für den Import.

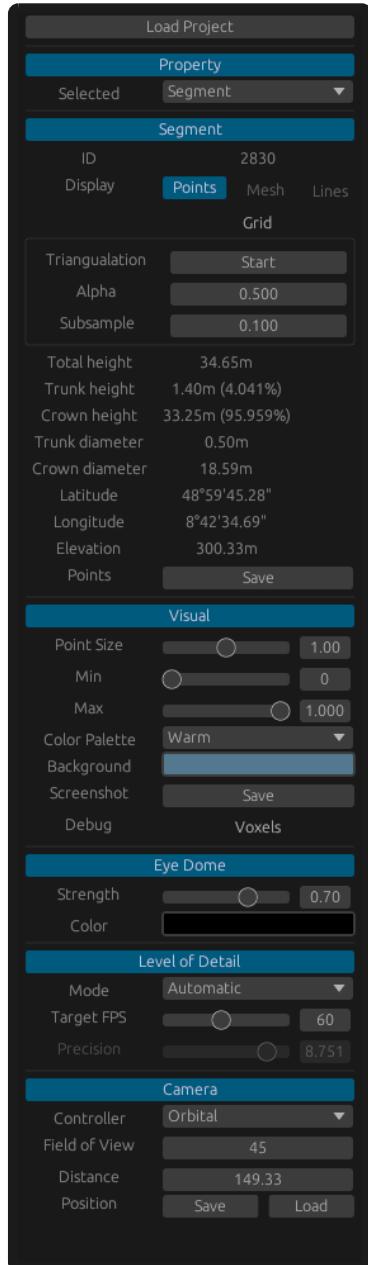
7.2.4 Visualisierung

Um eine Punktwolke zu öffnen, wird die `project.json` Datei eingelesen. In der Datei ist die Struktur vom Octree und Informationen über die Segmente enthalten. Die Punktdaten sind in separaten Dateien gespeichert und werden noch nicht geladen.

Je nach Position der Kamera werden die benötigten Punkte geladen, welche momentan sichtbar sind. Dadurch können auch Punktwolken angezeigt werden, die mehr Punkte enthalten als gleichzeitig interaktiv anzeigbar sind. Auch wenn ein

einzelnes Segment angezeigt wird, ist nur das Segment geladen, welches ausgewählt wurde.

Mit dem Benutzerinterface kann die Visualisierung angepasst und Informationen angezeigt werden. Die Optionen und einsehbare Informationen sind in Abbildung 23 erklärt.



- **Load Project**
 - Andere Punktfolge öffnen
- **Property**
 - Die angezeigte Eigenschaft ändern
- **Segment**
 - Punkte, Linien oder Dreiecke anzeigen
 - Triangulation starten
 - Informationen über das ausgewählte Segment anzeigen
 - Segment speichern
- **Visual**
 - Punktgröße ändern
 - Punkte basierend auf der ausgewählten Eigenschaft filtern
 - Farbpalette wechseln
 - Hintergrundfarbe ändern
 - Screenshot speichern
 - Unterteilung der Detailstufen anzeigen
- **Eye Dome**
 - Stärke und Farbe vom Eye-Dome-Lighting ändern
- **Level of Detail**
 - Auswahl und Qualität der Detailstufen anpassen
- **Camera**
 - Steuerung der Kamera ändern
 - Kameraposition speichern oder wiederherstellen

Abbildung 23: Benutzerinterface mit den verfügbaren Optionen und Informationen.

7.3 Struktur vom Quelltext

Das Softwareprojekt ist in mehrere Module unterteilt, um den Quelltext zu strukturieren. In [Tabelle 5](#) und [Abbildung 24](#) sind die Module mit zugehöriger Funktionalität und Abhängigkeiten gelistet. Die wichtigsten Module sind `importer` und `viewer`, welche den Import und die Visualisierung beinhalten. Das Modul `treee` ist ein gemeinsames Interface für `importer` und `viewer`, wodurch ein ausführbares Programm für das ganze Projekt erstellt werden kann.

Name	Funktionalität
<code>input</code>	Maus- und Tastatureingaben verarbeiten
<code>data-file</code>	Daten zusammengefasst in einer Datei speichern
<code>project</code>	Format für eine Punktfolge und zugehörige Daten
<code>k-nearest</code>	Nachbarschaftssuche mit KD-Bäumen
<code>render</code>	Rendern von Punktfolgen, Linien und Dreiecken mit <code>wgpu</code>
<code>viewer</code>	Visualisierung von Punktfolgen
<code>triangulation</code>	Triangulation von einer Punktfolge
<code>importer</code>	Import von Punktfolgen
<code>treee</code>	Gemeinsames Interface für <code>importer</code> und <code>viewer</code>

Tabelle 5: Module vom Projekt mit zugehöriger Funktionalität.

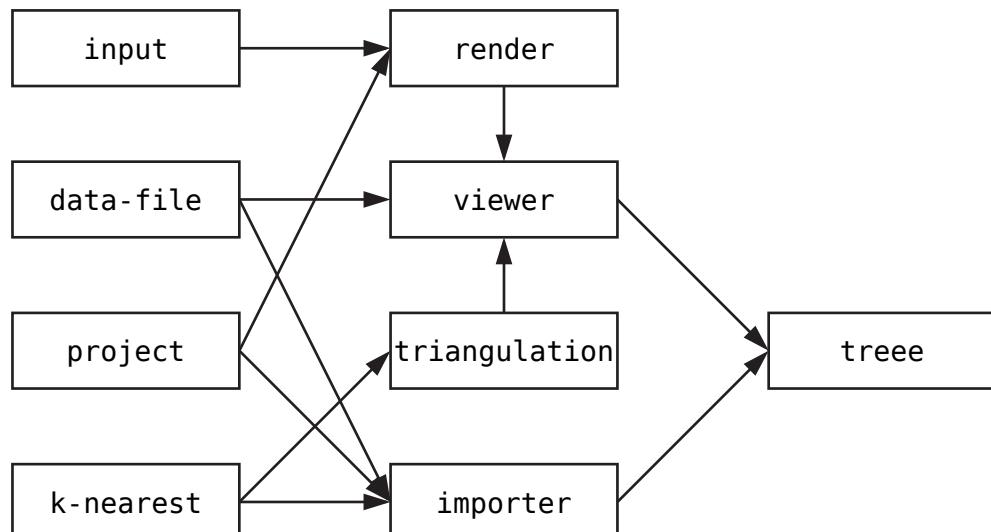


Abbildung 24: Abhängigkeiten der Module untereinander.

7.4 Import

Um einen Datensatz zu analysieren, muss dieser zuerst importiert werden, bevor er von der Visualisierung angezeigt werden kann. Der Import wird in mehreren getrennten Phasen durchgeführt. Dabei wird der Berechnungsaufwand für eine Phase so weit wie möglich parallelisiert. Die Phasen sind:

1. Daten laden
2. Segmente bestimmen
3. Segmente analysieren und den Octree erstellen
4. Detailstufen bestimmten und Octree speichern

Der zugehörige Datenfluss ist in [Abbildung 25](#) zu sehen. Nach der ersten Phase sind die Punktdaten bekannt und nach der zweiten Phase auf die Segmente aufgeteilt. In der dritten Phase werden dann die Segmente verarbeitet und der Octree aufgebaut. Nach der vierten Phase ist auch der Octree vollständig und die Punkt-wolke wird abgespeichert.

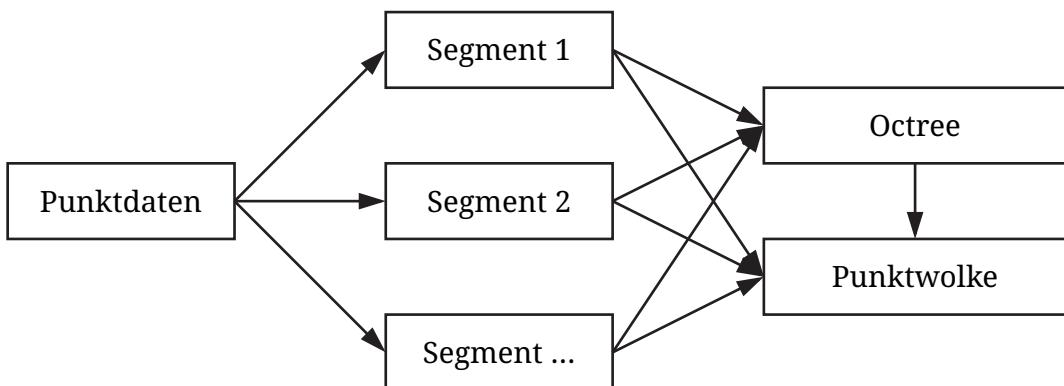


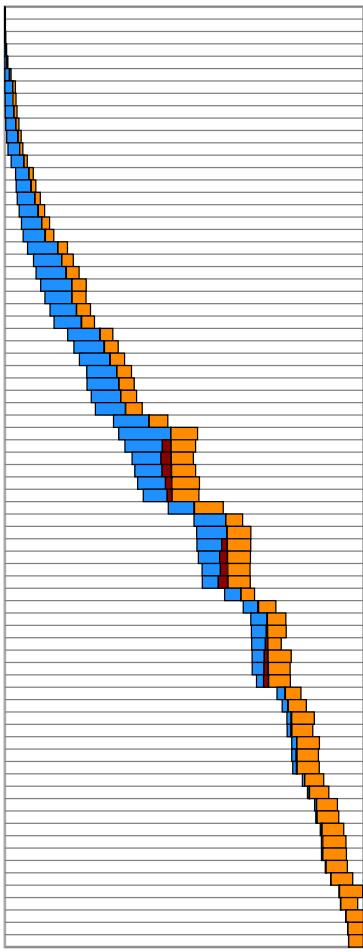
Abbildung 25: Datenfluss beim Import.

7.4.1 Parallelisierung

Die Punktdaten werden in LASzip Dateien zu Blöcken zusammengefasst. Jeder Block wird separat komprimiert, wodurch mehrere Blöcke auch parallel dekomprimiert werden können. Ein weiterer Thread sammelt die dekomprimierten Blöcke für die Segmentierung.

Für die Segmentierung wird über die einzelnen horizontalen Scheiben parallelisiert. Der genaue Ablauf ist in [Abbildung 26](#) erklärt. Mit einem weiteren Thread werden die Segmente gesammelt.

Die Analyse der Segmente und die Berechnung der Detailstufen sind trivial parallelisierbar. Die Segmente haben untereinander keine Datenabhängigkeiten, wodurch diese parallel verarbeitet werden können. Bei den Detailstufen haben die Kinderknoten untereinander keine Abhängigkeiten.



Bei der Segmentierung werden die Punkte von oben nach unten in Scheiben verarbeitet. Jede Scheibe wird in den folgenden Stufen verarbeitet.

1. Zusammenhängenden Bereiche von den Punkten bestimmen.
2. Mit den Bereichen und den Koordinaten der vorherigen Scheibe die Koordinaten für die momentane Scheibe berechnen.
3. Punkte auf die Koordinaten verteilen.

Dabei wird für die zweite Stufe die Koordinaten aus der vorherigen Scheibe benötigt.

In der Grafik ist der Arbeitsaufwand dargestellt. Von oben nach unten sind die Scheiben und von links nach rechts die Zeit abgebildet. Die erste Stufe ist in Blau, das Warten auf die vorherige Scheibe in Rot und die dritte Stufe in Orange. Der Berechnungsaufwand der zweiten Stufe ist sehr kurz, wodurch diese nicht in der Grafik sichtbar ist.

Die Berechnung wurde mit sieben Threads durchgeführt, wodurch bis zu sieben Scheiben in parallel verarbeitet werden können. Durch die Datenabhängigkeit kann aber die zweite Stufe erst verarbeitet werden, wenn von der vorherigen Scheibe die zweite Stufe beendet ist. Wenn die erste Stufe länger dauert, müssen deshalb andere Threads warten.

Abbildung 26: Parallelisierung der Segmentierung.

7.5 Format für eine Punktfolge

Die Struktur von einer Punktfolge ist in der `project.json` Datei gespeichert. Dazu gehören die verfügbaren Eigenschaften und der Octree. Alle benötigten Daten für `project.json` werden in `project/src/lib.rs`⁶ definiert.

7.5.1 Daten

In separaten Dateien werden die Daten für die Punkte oder Eigenschaften gespeichert. Das verwendete Dateiformat ermöglicht es, die Dateien inkrementell zu erstellen. Am Anfang wird nur benötigt, wie viele Einträge die Datei speichern kann. Danach können die Einträge in beliebiger Reihenfolge abgespeichert werden.

Die Struktur ist in [Tabelle 6](#) gegeben. Am Anfang der Datei wird für jeden Eintrag die Startposition s_i und die Länge l_i vom zugehörigen Datensegment d_i gespeichert. Danach folgen die Datensegmente in beliebiger Reihenfolge π .

⁶<https://github.com/antonWetzel/treee/blob/main/project/src/lib.rs>

Informationen							Daten			
s_0	l_0	s_1	l_1	...	s_{n-1}	l_{n-1}	$d_{\pi(0)}$	$d_{\pi(1)}$...	$d_{\pi(n-1)}$

Tabelle 6: Struktur einer Datei zum Speichern von Daten.

Um den Eintrag i mit den Daten d zur Datei hinzufügen, wird zuerst s_i auf das momentane Ende der Datei und l_i auf die Länge von d gesetzt. Danach wird d am Ende der Datei hinzugefügt. Um die Daten für den Eintrag i zu lesen, wird zuerst s_i und l_i ausgelesen und danach der zugehörige Bereich geladen.

7.6 Visualisierung

7.6.1 Punkte

Die benötigten Daten für die Visualisierung von einem Punkt sind das verwendete Polygon, Position, Normale, Größe und ausgewählte Eigenschaft. Das Polygon ist gleich für alle Punkte und muss deshalb nur einmal zur Grafikkarte übertragen werden und wird für alle Punkte wiederverwendet.

Für die Grafikpipeline wird das Polygon in Dreiecke zerlegt. In [Abbildung 27](#) sind die getesteten Varianten gegeben. Die Dreiecke werden dann mit der Kamera projiziert und es werden alle Pixel bestimmt, welche in den Dreiecken liegen. Für jedes Pixel kann entschieden werden, ob dieser im Ergebnis gespeichert wird. Dafür wird bei den Eckpunkten die Koordinaten ohne die Transformation der Kamera abgespeichert, dass diese später verfügbar sind. Für jedes Pixel wird von der Pipeline die interpolierten Koordinaten berechnet. Nur wenn der Betrag der interpolierten Koordinaten kleiner als eins ist, wird der Pixel im Ergebnis abgespeichert.

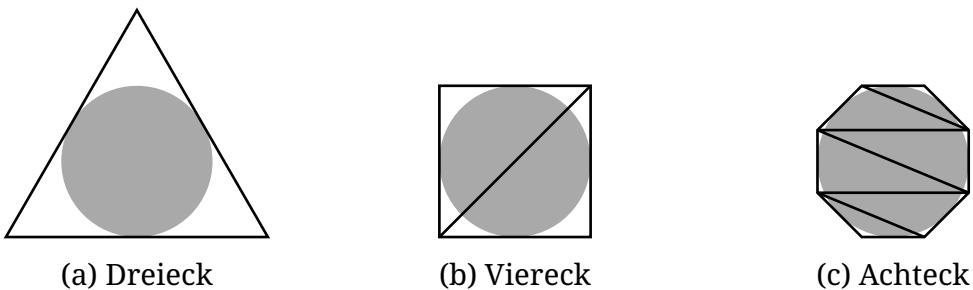


Abbildung 27: Zerlegung von unterschiedlichen Polygonen in Dreiecke.

In [Abbildung 28](#) sind die Zeiten für das Rendern von Punkten mit unterschiedlichen Polygonen gegeben. Die beste Option ist das Dreieck als Polygon. Für die Zerlegung vom Polygon mit n Ecken in Dreiecke werden $n - 2$ Dreiecke und somit $3n - 6$ Ecken benötigt. Der benötigte Aufwand entsteht größtenteils durch die Ecken, wodurch das Quadrat circa doppelt und das Achteck sechsmal so lange zum Rendern benötigen.

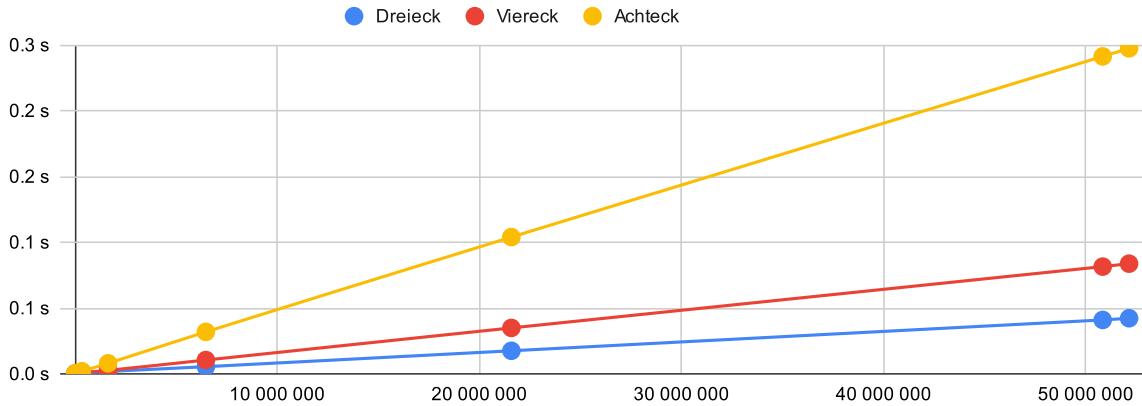


Abbildung 28: Renderzeit bei unterschiedlichen Polygonen abhängig von der Anzahl der Punkte.

Die ausgewählte Eigenschaft wird durch das Einfärben der Punkte angezeigt. Dabei kann die ausgewählte Eigenschaft geändert werden, ohne die anderen Informationen über die Punkte neu zu laden. Dafür wird die Eigenschaften separat als Wert zwischen 0 und n gespeichert und mit einer Farbpalette in einen Farbverlauf umgewandelt. n kann dabei maximal $2^{32} - 1$ sein, weil 32 Bit für das Speichern der Eigenschaften verwendet werden. Mit n und einer Farbpalette unabhängig von den Daten wird der Wert in die Farbe für den Punkt umgewandelt. Die verfügbaren Farbpaletten sind in Abbildung 29 zu sehen.

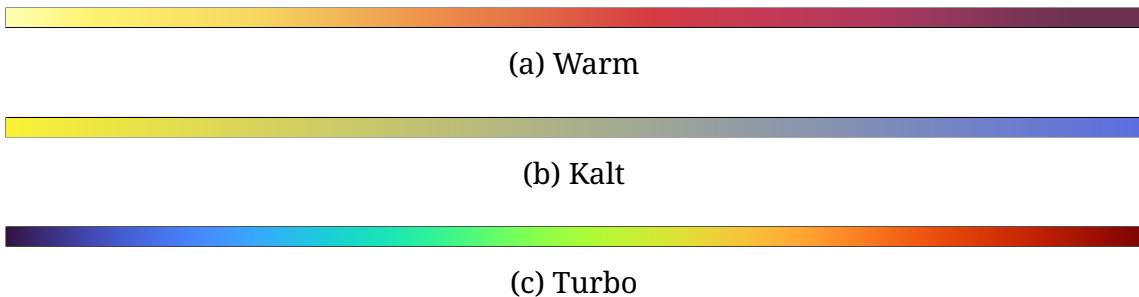


Abbildung 29: Verfügbare Farbpaletten.

7.6.2 Segmente

Auswahl

Um ein bestimmtes Segment auszuwählen, wird das momentan sichtbare Segment bei der Mausposition berechnet. Als Erstes werden die Koordinaten der Maus mit der Position und Orientierung der Kamera in einen dreidimensionalen Ursprung und Richtung umgewandelt. Der Ursprung und die Richtung bilden zusammen einen Strahl.

Im Octree wird vom Root-Knoten aus die Leaf-Knoten gesucht, welche den Strahl enthalten. Dafür wird bei einem Branch-Knoten die acht Kinderknoten betrachtet. Für jeden Kinderknoten wird überprüft, ob der Strahl den Bereich vom Knoten

scheidet und gegebenenfalls wird der Abstand zur Kamera berechnet. Weil der Voxel zugehörig zum Knoten entlang der Achsen vom Koordinatensystem ausgerichtet ist, kann mit dem Algorithmus in [Abbildung 30](#) überprüft werden, ob der Strahl den Voxel berührt ([Majercik u. a. 2018](#)). Zuerst wird für jede Achse der Bereich bestimmt, für den der Strahl im Quadrat liegen kann. Die Schnittmenge ist die Überschneidung von den Bereichen für alle Achsen.

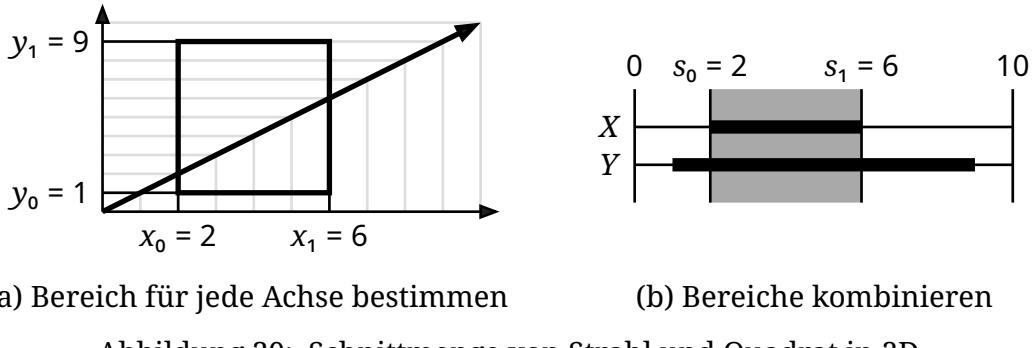


Abbildung 30: Schnittmenge von Strahl und Quadrat in 2D.

Nachdem alle Kinderknoten gefunden wurden, die den Strahl enthalten, werden diese nach Abstand zur Kamera sortiert. Die weitere Suche wird zuerst für die näheren Knoten durchgeführt.

Für einen Leaf-Knoten wird der Punkt gesucht, welcher zuerst vom Strahl berührt wird. Dafür werden alle Punkte im Knoten betrachtet. Für jeden Punkt wird zuerst die Distanz vom Strahl bestimmt. Wenn die Distanz kleiner als der Radius vom Punkt ist, wird der Abstand zum Ursprung vom Strahl berechnet. Der Punkt mit dem kleinsten Abstand zum Ursprung ist der ausgewählte Punkt. Wenn kein Punkt gefunden wird, wird der nächste Knoten entlang des Strahls betrachtet.

Weil die Knoten nach Distanz sortiert betrachtet werden, kann die Suche abgebrochen werden, sobald ein Punkt gefunden wurde. Alle weiteren Knoten sind weiter entfernt, wodurch die enthaltenen Punkte nicht näher zum Ursprung vom Strahl liegen können.

Visualisierung

Im Octree kann zu den Punkten in einem Leaf-Knoten mehrere Segmente gehören. Um die Segmente einzeln anzuzeigen, wird jedes Segment zusätzlich separat abgespeichert. Sobald ein Segment ausgewählt wurde, wird dieses geladen und anstatt des Octrees angezeigt. Dabei werden alle Punkte des Segments ohne vereinfachte Detailstufen verwendet.

Die momentan sichtbaren Knoten vom Octree bleiben dabei geladen, um einen schnellen Wechsel zurück zur vollständigen Punktwolke zu ermöglichen.

Exportieren

Die Segmente können im Stanford Polygon Format (PLY) exportiert werden. Jeder Punkt wird dabei so transformiert, dass die Höhe entlang der z-Achse mit 0 für den tiefsten Punkt gespeichert wird. Die horizontale Position der Punkte wird entlang

der x- und y-Achse so verschoben, dass die Ausdehnung vom Segment in der positiven und negativen Richtung gleich ist.

7.6.3 Detailstufen

Beim Anzeigen vom Octree wird vom Root-Knoten aus zuerst geprüft, ob der momentane Knoten von der Kamera aus sichtbar ist. Wenn ein Knoten nicht sichtbar ist, so wird dieser nicht geladen und angezeigt. In [Abbildung 31](#) ist ein Beispiel für das Filtern bei unterschiedlichen Detailstufen gegeben. Weil nur ein Teil vom Knoten von der Kamera aus sichtbar sein muss, können bei größeren Knoten der Großteil der Punkte außerhalb der Kamera liegen und werden trotzdem angezeigt.

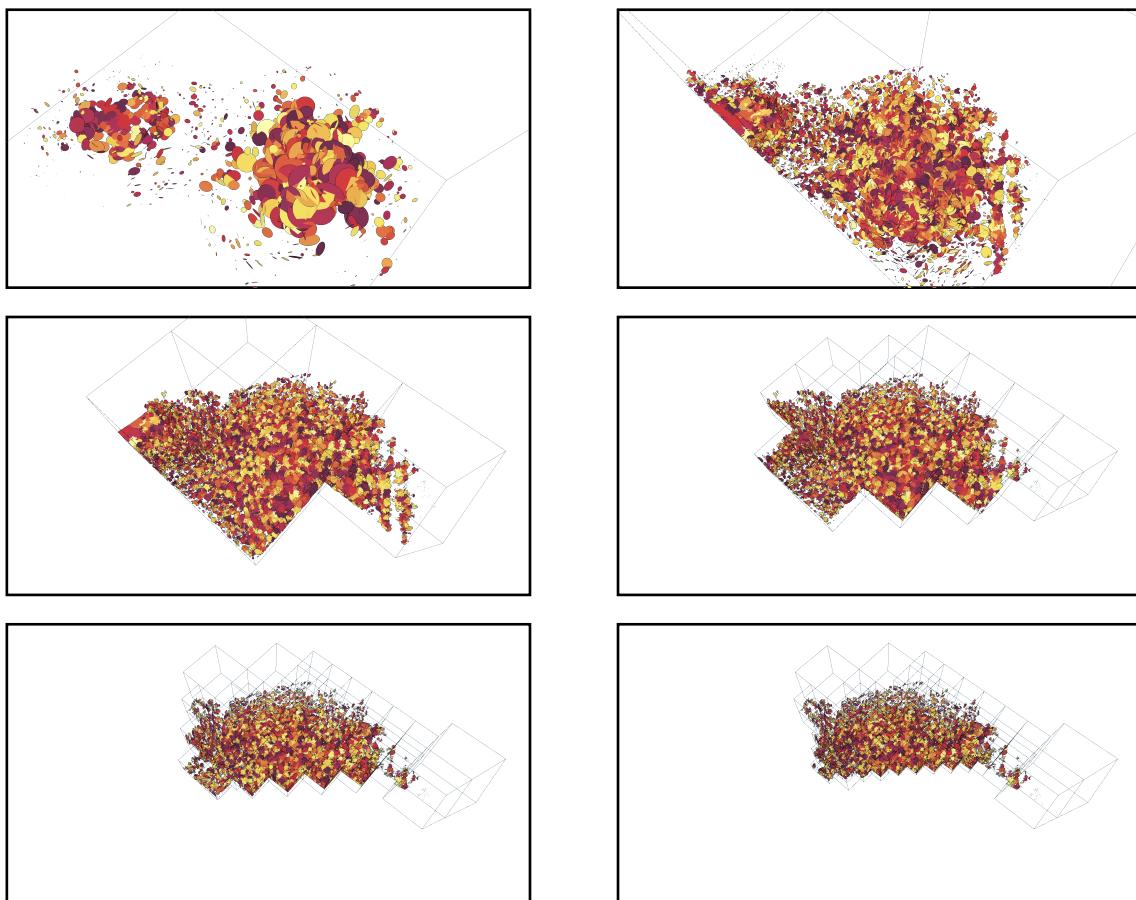


Abbildung 31: Sichtbare Knoten für unterschiedliche Detailstufen.

Die Auswahl der Detailstufen kann dabei geändert werden. Im Normalfall wird die gewünschte Detailstufe abhängig vom Abstand zur Kamera ausgewählt. Dadurch werden in der Nähe der Kamera genauere Detailstufen oder die originalen Punkte angezeigt und weit von der Kamera entfernt werden die Detailstufen immer weiter vereinfacht. Eine andere Option ist es, die gleiche Detailstufe für alle Knoten zu verwenden.

8 Auswertung

8.1 Testdaten

Der benutze Datensatz⁷ beinhaltet zwölf Hektar Waldfläche in Deutschland, Baden-Württemberg ([Hannah Weiser u. a. 2022](#)). Die Daten sind mit Laserscans aufgenommen, wobei die Scans von Flugzeugen (ALS⁸), Drohnen (ULS⁹) und vom Boden (TLS¹⁰) aus durchgeführt wurden. Die 3D-Punktwolken sind im komprimierten LASzip Dateiformat gegeben.

Für die meisten Waldgebiete existieren ALS-, ULS- und TLS-Daten. Dabei enthalten die ALS-Daten die wenigsten und die TLS-Daten die meisten Punkte. Bei den ALS- und ULS-Daten sind die Punkte gleichmäßig über das gescannte Gebiet verteilt. Bei den TLS-Daten wird von einem festen Punkt aus gescannt, wodurch die Punkt-dichte nach außen immer weiter abnimmt.

Der Datensatz ist bereits in einzelne Bäume unterteilt. Zusätzlich wurden für sechs Hektar die Baumart, Höhe, Stammdurchmesser auf Brusthöhe und Anfangshöhe und Durchmesser der Krone gemessen. Mit den bereits bestimmten Eigenschaften können automatisch berechnete Ergebnisse validiert werden.

8.2 Importgeschwindigkeit

In [Abbildung 32](#) sind die Importgeschwindigkeiten gegeben. Die Eigenschaften vom verwendeten System sind in [Abschnitt 10.4](#) und die genauen Messwerte in [Abschnitt 10.5](#) gelistet. Für jedes Waldgebiet wurde jeweils ein zufälliger Datensatz von den ALS-, ULS- und TLS-Daten verwendet.

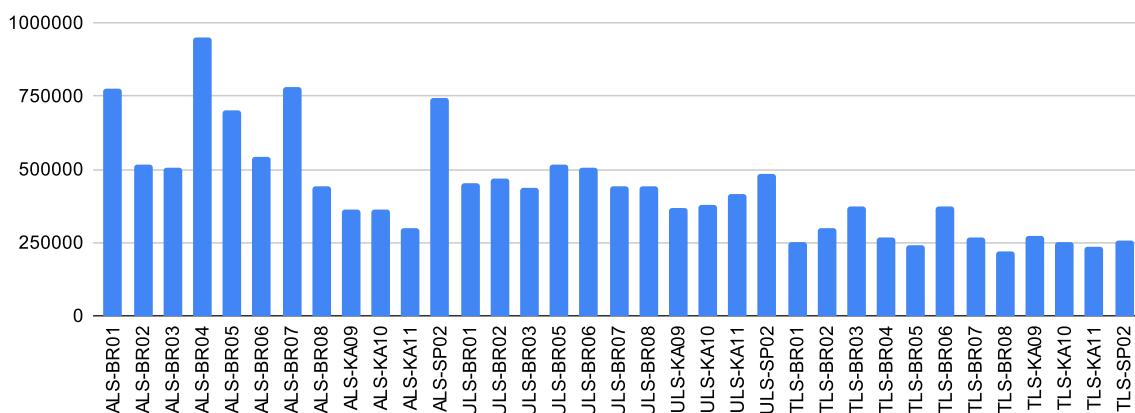


Abbildung 32: Geschwindigkeit vom Import in Punkte pro Sekunde.

⁷Terrestrial, UAV-borne, and airborne laser scanning point clouds of central European forest plots, Germany, with extracted individual trees and manual forest inventory measurements

⁸aircraft laser scan

⁹uncrewed aerial vehicle laser scan

¹⁰terrestrial laser scan

Bei den ALS-Daten wird für die meisten Datensätze eine Importgeschwindigkeit von 500 000 Punkte pro Sekunde erreicht. Durch die kleinen Datenmengen schwankt aber die Importgeschwindigkeit stark. Für die ULS-Daten liegt die Importgeschwindigkeit bei 400 000 und für die TLS-Daten bei 250 000.

In [Abbildung 33](#) sind die absoluten und relativen Dauern für die einzelnen Phasen vom Import aufgeschlüsselt. Am längsten wird für die Analyse der Segmente benötigt, weil für jeden Punkt die benötigten Eigenschaften berechnet werden.

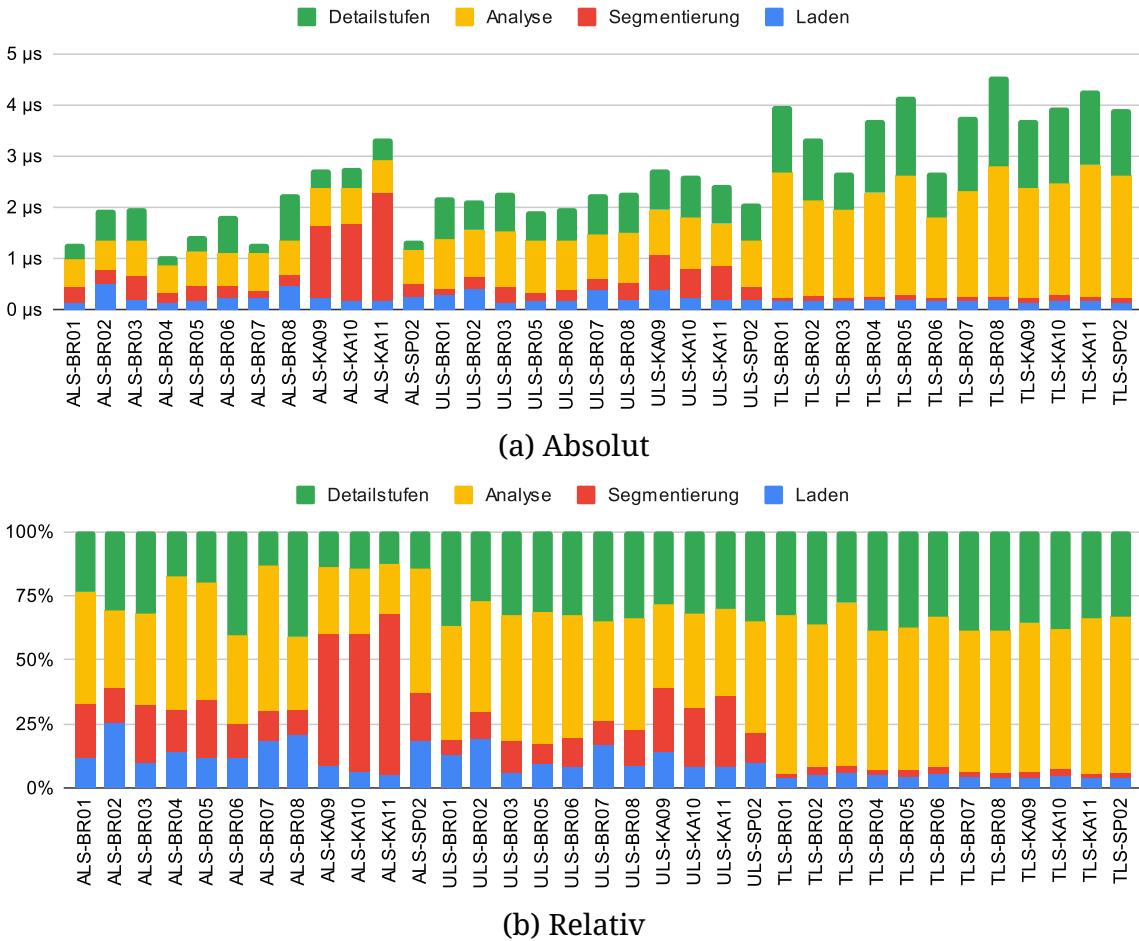


Abbildung 33: Dauer für die einzelnen Importphasen pro Punkt.

Bei den TLS-Daten enthalten durch die ungleiche Punktdichte manche Segmente überproportional viele Punkte, wodurch die Analyse von diesen Segmenten pro Punkt länger dauert.

Wie in [Abbildung 34](#) zu sehen, ist bei den ALS-KAxx-Daten der Boden sehr eben, wodurch die Baumkronen ähnliche Höhen haben. Dadurch haben viele Punkte die gleiche Höhe und die Segmentierung dauert länger.



Abbildung 34: Seitenansicht für die Punktwolke ALS-KA10.

8.3 Segmentierung von Waldgebieten

Beispiele für die Segmentierung sind in [Abbildung 35](#) gegeben. Die meisten Bäume werden korrekt erkannt und zu unterschiedlichen Segmenten zugeordnet. Je weiter die Spitzen der Bäume voneinander getrennt sind, desto besser können die Bäume voneinander unterschieden werden. Für Bäume, bei denen die Baumkronen keine klare Trennung haben, werden die Bäume fehlerhaft zu einem Segment zusammengefasst.

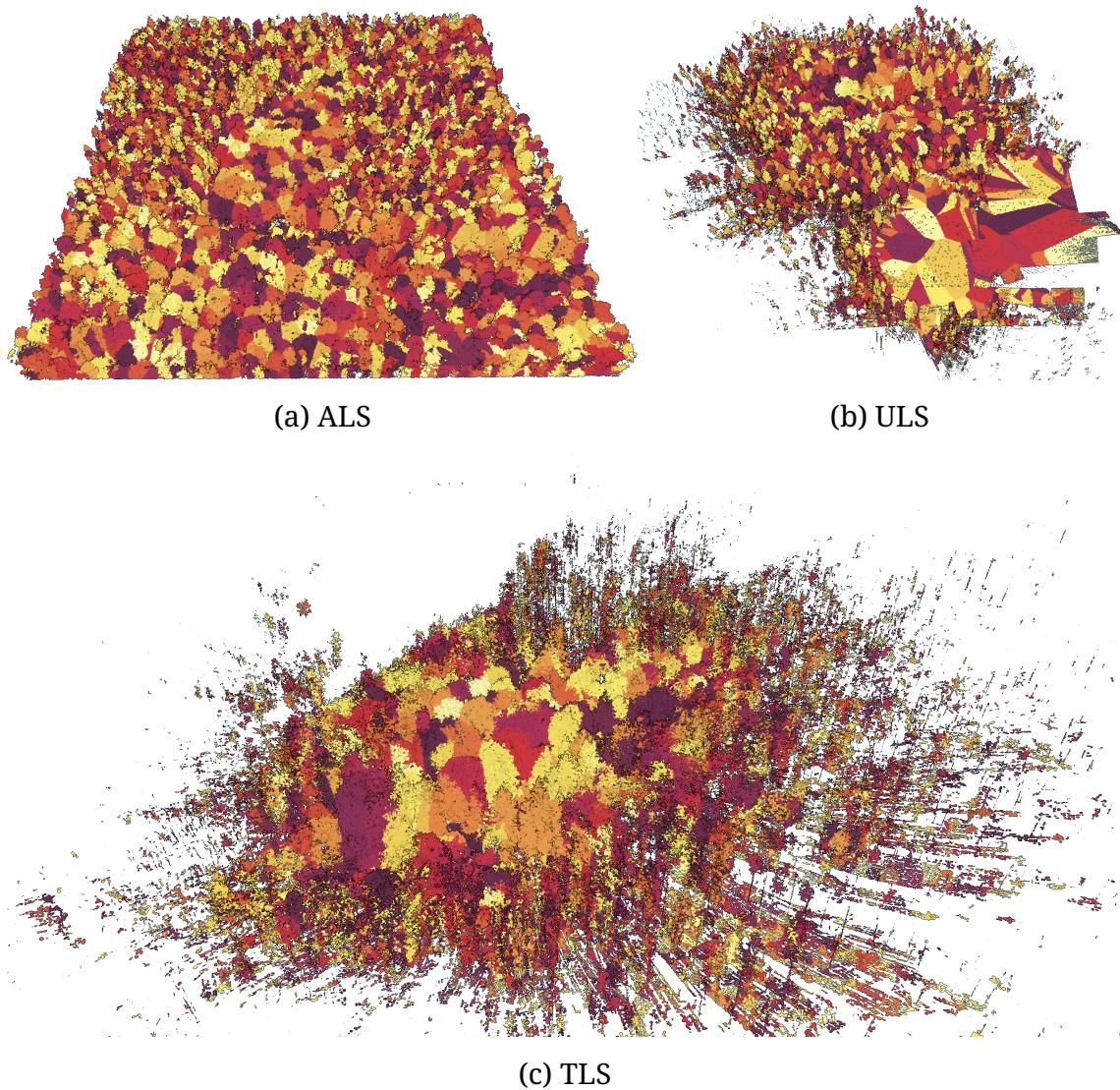


Abbildung 35: Segmentierung von unterschiedlichen Punktwolken.

Punkte, welche zu keinem Baum gehören, werden trotzdem zu den Segmenten zugeordnet. Dadurch entstehen Segmente wie in [Abbildung 36](#). Die Punkte in den freien Flächen werden zu eigenen Segmenten zusammengefasst, welche zu keinem Baum gehören. Wenn die Punkte in der Nähe von einem Baum liegen, werden diese als Boden zu dem Baum hinzugefügt.

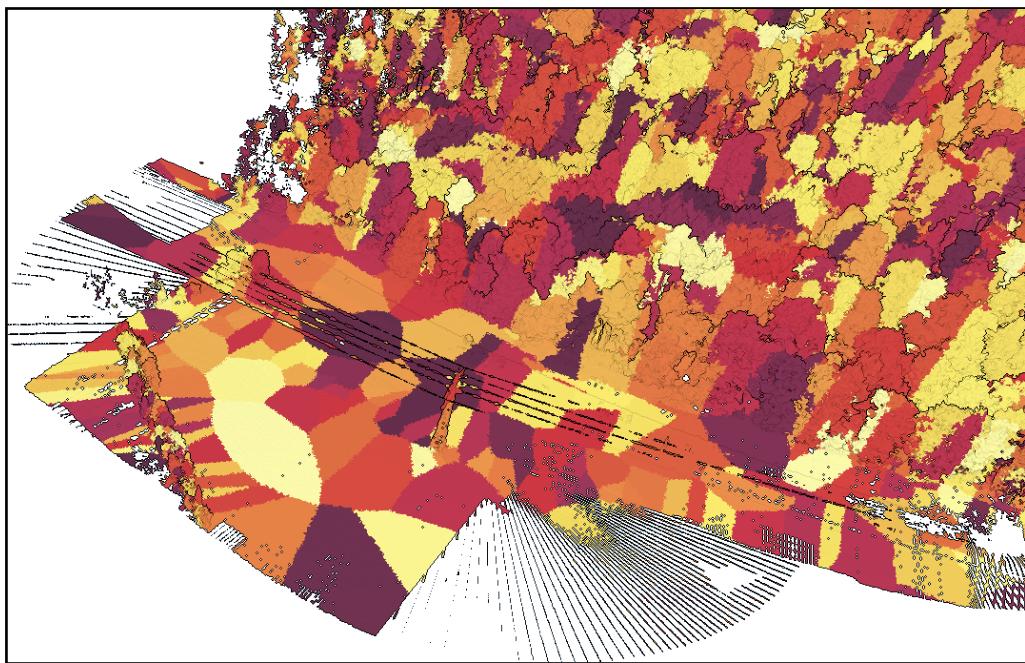
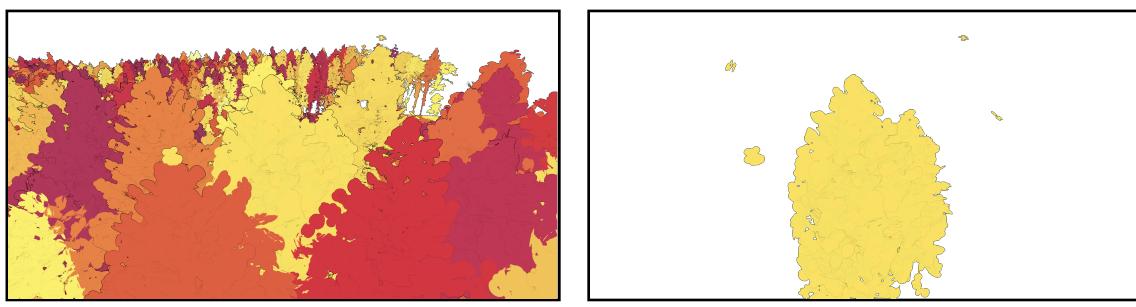


Abbildung 36: Segmente bei Gebieten ohne Bäume.

Kleine Bereiche werden vor der Zuordnung entfernt. Dadurch wird vermieden, dass ein Baum in mehrere Segmente unterteilt wird. Wenn die Spitze von einem Baum gerade so in einer Scheibe liegt, so ist der zugehörige Bereich klein und wird gefiltert. Dadurch wird kein neues Segment für den Baum erstellt und die Punkte werden dem falschen nächsten Baum zugeordnet. Der Effekt ist in [Abbildung 37](#) zu sehen. Die Spitzen von den umliegenden Bäumen wurden dem nächsten größeren Baum zugeordnet.



(a) Alle Segmente

(b) Segment einzeln

Abbildung 37: Segmentierungsfehler bei Baumspitzen.

8.4 Triangulierung

Ein Beispiel für die Triangulation ist in Abbildung 38 gegeben. Mit dem Ball-Pivoting Algorithmus wird eine äußere Hülle für die Punkte bestimmt, wodurch der Algorithmus auch für eine Baumkrone mit Blättern geeignet ist.

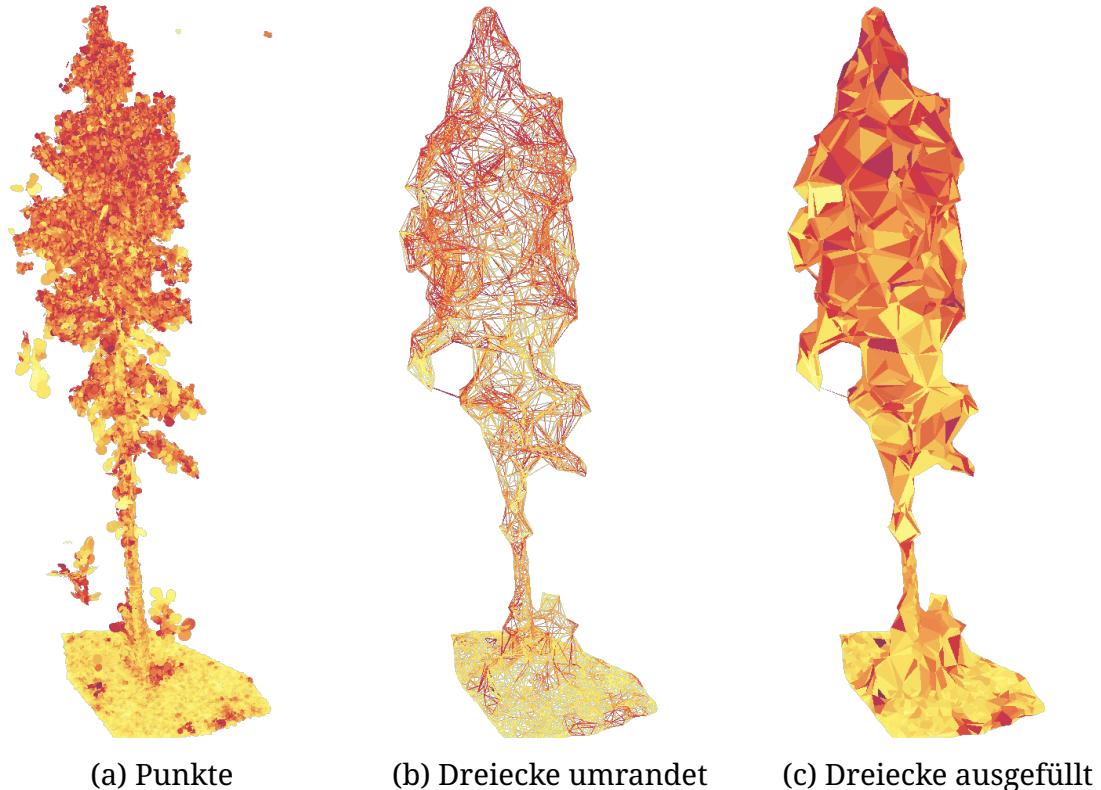


Abbildung 38: Beispiel für eine Triangulierung von einem Baum mit $\alpha = 1 \text{ m}$.

Beim Baumstamm liegen alle Punkte auf der Oberfläche, wodurch diese ohne Probleme trianguliert werden können. Bei der Krone sind die Punkte im Raum verteilt, wodurch diese nicht auf einer eindeutigen Oberfläche liegen.

Mit einem ausreichend großen Wert für α wird eine passende äußere Hülle berechnet. Bei Bereichen ohne Punkte wird für kleine α keine passende Oberfläche gefunden, wodurch das berechnete Dreiecksnetz fehlerhaft ist.

8.5 Visualisierung

Die gleiche Punktfolge ist in Abbildung 39 jeweils mit und ohne Detailstufen und Eye-Dome-Lighting gegeben. Die Detailstufen sind nicht von den originalen Punkten optisch zu unterscheiden und das Eye-Dome-Lighting ermöglicht eine bessere Wahrnehmung der verlorenen Tiefeninformationen.

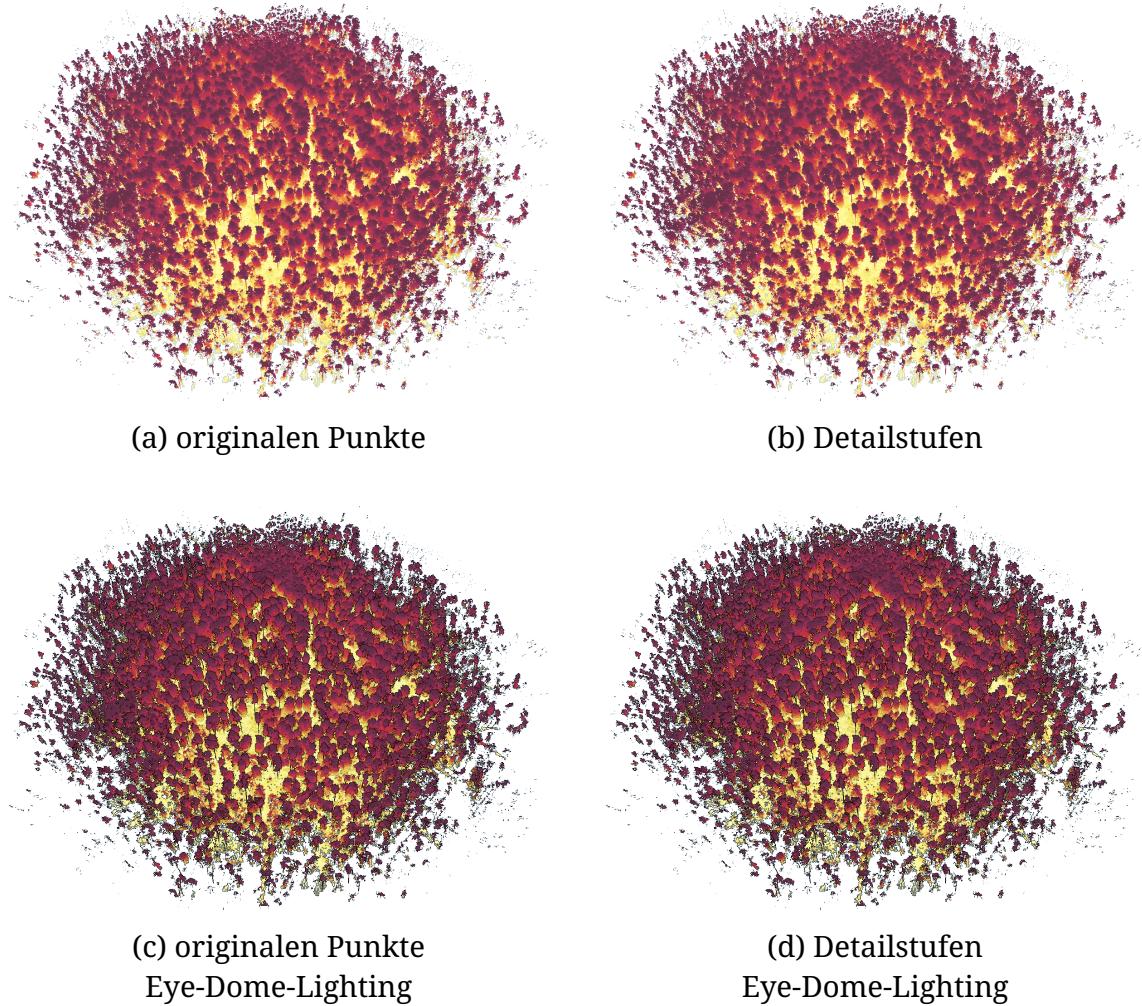


Abbildung 39: Visualisierung von einem Datensatz mit 59 967 504 Punkten.

Wie in [Abbildung 40](#) zu sehen, ist die Renderzeit durch die Detailstufen ein Bruchteil im Vergleich zur Dauer für die originalen Punkte. Das Eye-Dome-Lighting hat unabhängig von der Anzahl der sichtbaren Punkte keinen relevanten Effekt auf die Renderzeit.

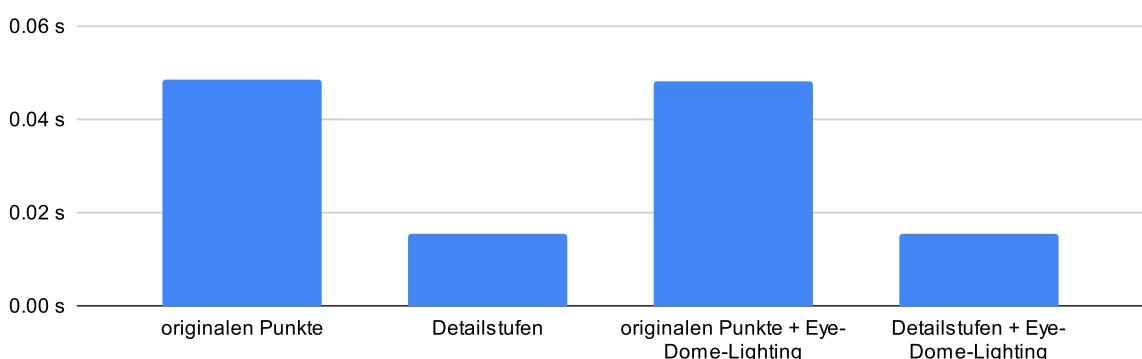


Abbildung 40: Renderzeit für einen Datensatz mit 59 967 504 Punkten.

Der Speicherbedarf für die Detailstufen ist in [Abbildung 41](#) gelistet. Für diese wird im Durchschnitt zusätzlich die Hälfte vom Speicherbedarf von den originalen Punkten benötigt.

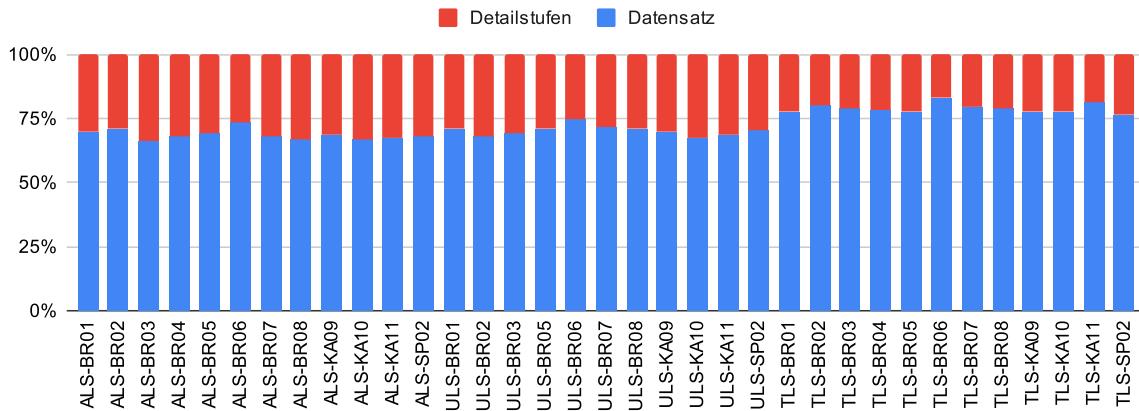


Abbildung 41: Speicherbedarf für die Punkte vom Datensatz und der Detailstufen.

8.6 Analyse von Bäumen

8.6.1 Punkteigenschaften

In [Abbildung 42](#) ist ein Segment basierend auf der Krümmung eingefärbt. Die Punkte mit der größten Krümmung gehören zu den Blättern, was eine Filterung ermöglicht. Die Punkte beim Stamm und teilweise in der Krone haben eine geringere Krümmung.

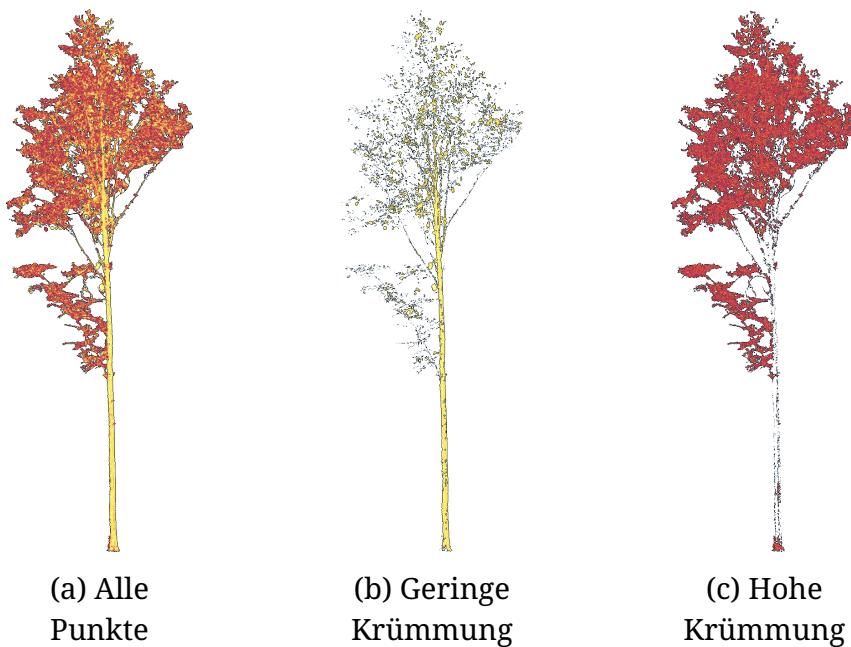


Abbildung 42: Punktfolke basierend auf der Krümmung eingefärbt.

Die Krümmung wurde für jeden Punkt mit den 31 nächsten Punkten bestimmt, wodurch für dichtere Bereiche in der Punktfolge nur ein sehr kleines Gebiet betrachtet wird. Um den Einflussradius zu erhöhen, können mehr Punkte für die Nachbarschaft verwendet werden, dadurch steigt aber auch der Berechnungsaufwand. Eine andere Option ist es, für jeden Punkt die durchschnittliche Krümmung der umliegenden Punkte zu verwenden. Der Durchschnitt kann mit der bereits vorhandenen Nachbarschaft einfach berechnet werden.

Der gleiche Baum ist in [Abbildung 43](#) basierend auf der horizontalen Ausdehnung eingefärbt. Punkte zugehörig zu einer geringen horizontalen Ausdehnung gehören immer zum Stamm oder der Spitze der Krone, wodurch der Übergang vom Stamm zur Baumkrone gefunden werden kann.

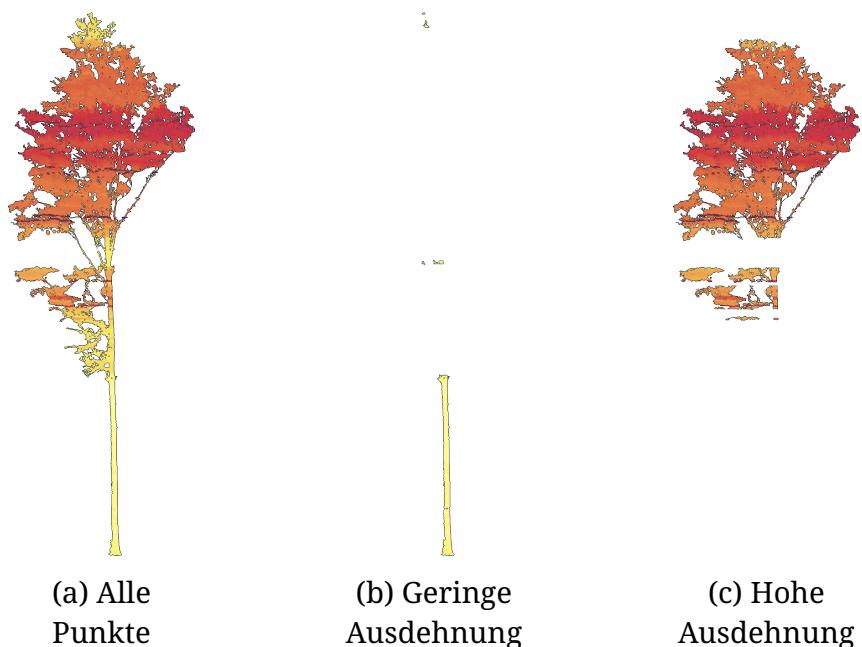


Abbildung 43: Punktfolge basierend auf der Ausdehnung eingefärbt.

8.6.2 Baumeigenschaften

Für die Auswertung von der Berechnung der Baumeigenschaften werden die berechneten Werte mit den direkt am Baum gemessenen Werten verglichen.

Für die Berechnung wurden die einzelnen bereits segmentierten Bäume aus dem Datensatz verwendet. Die Positionen der Bäume wurde mit einer Kombination von den ALS-, ULS- und TLS-Daten und einer manuellen Unterteilung der Punkte berechnet. Danach wurden alle Punktfolgen der Waldgebiete mit den Baumpositionen unterteilt, wodurch besonders für die ALS- und ULS-Daten für manche Bäume nur wenig Punkte bekannt sind ([H. Weiser u. a. 2022](#)). Eine Visualisierung vom Unterschied ist in [Abbildung 44](#) und [Abbildung 45](#) gegeben.

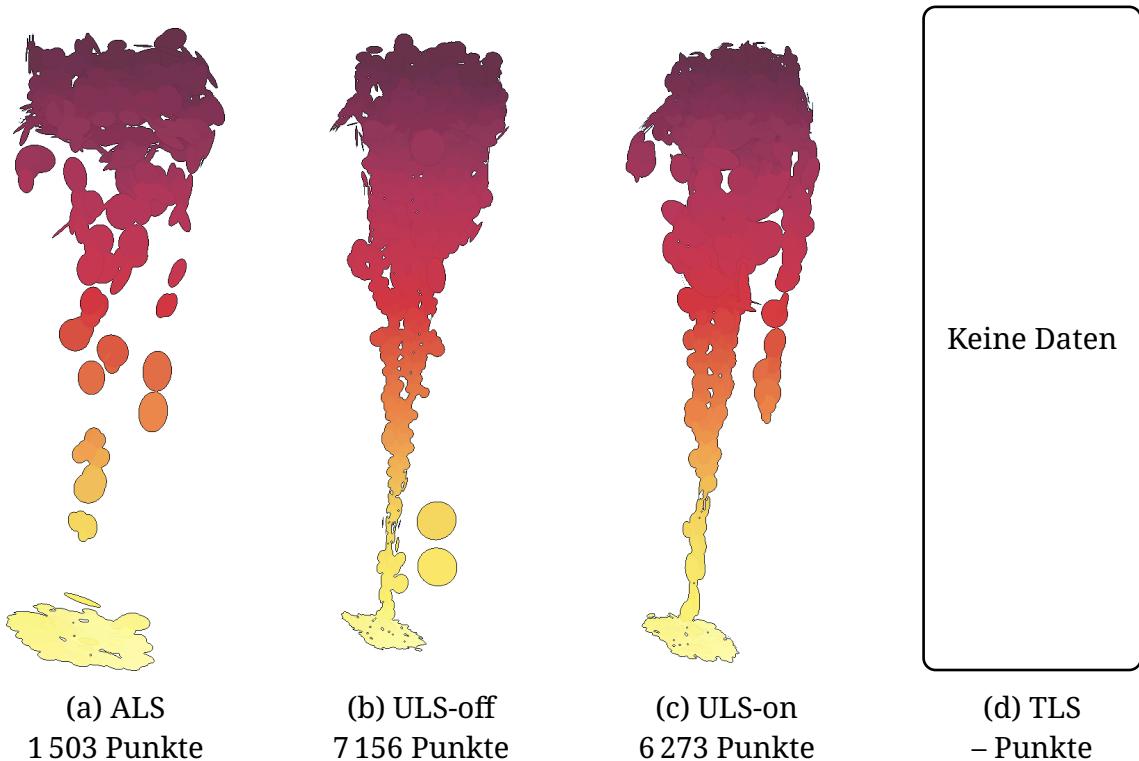


Abbildung 44: Vergleich zwischen den unterschiedlichen Daten für einen Baum mit wenig Punkten.

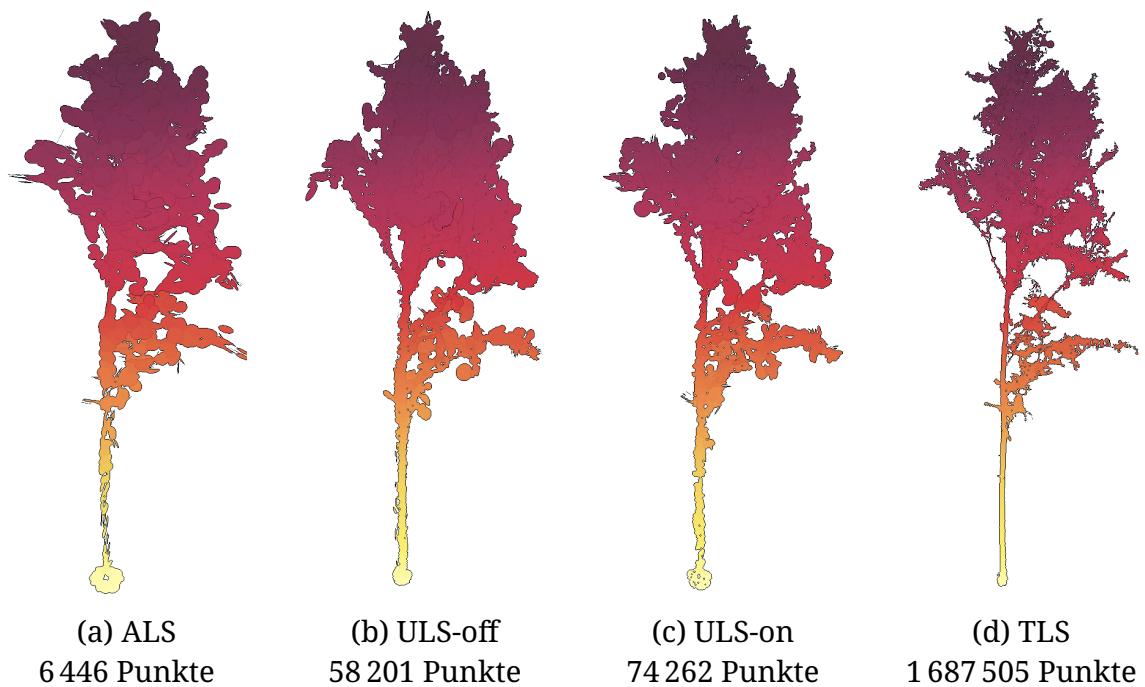
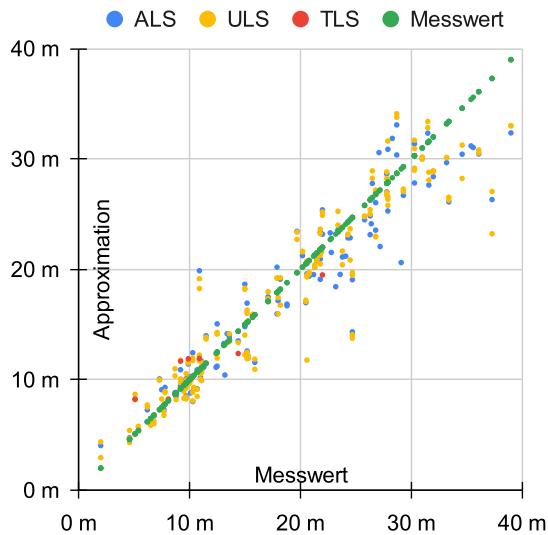
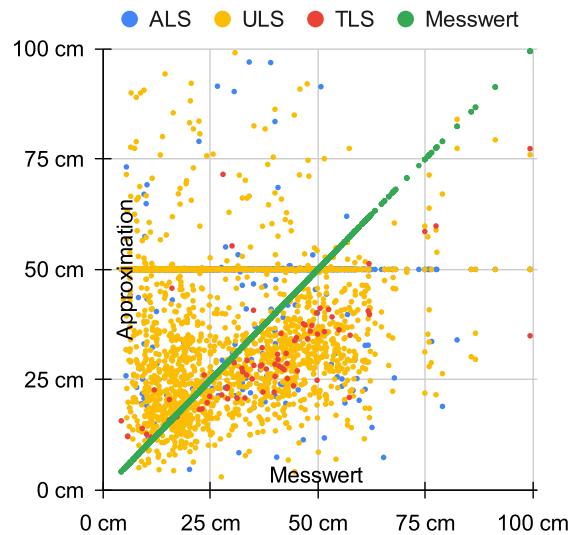


Abbildung 45: Vergleich zwischen den unterschiedlichen Daten für einen Baum mit vielen Punkten.

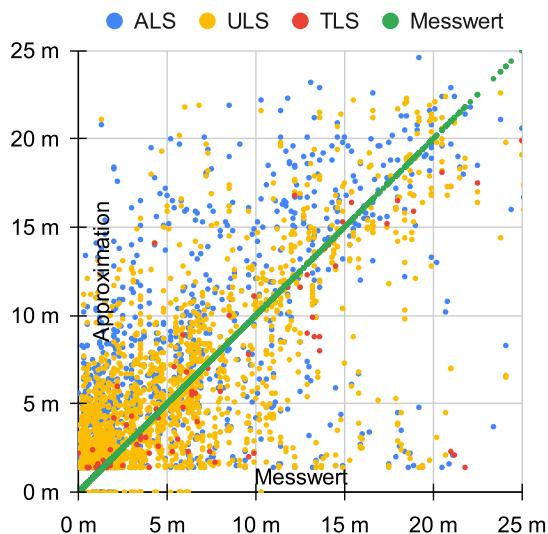
Die Datenpunkte sind in Abbildung 46 zu sehen. Entlang der x-Achse sind die gemessenen Werte und entlang der y-Achse sind die berechneten Werte. Im Idealfall sind beide Werte gleich, wodurch ein Datenpunkt auf der Diagonalen entsteht. Wenn ein Punkt oberhalb der Diagonalen ist, wurde ein zu großer Wert berechnet und ist der Punkt unterhalb, ist der berechnete Wert zu klein.



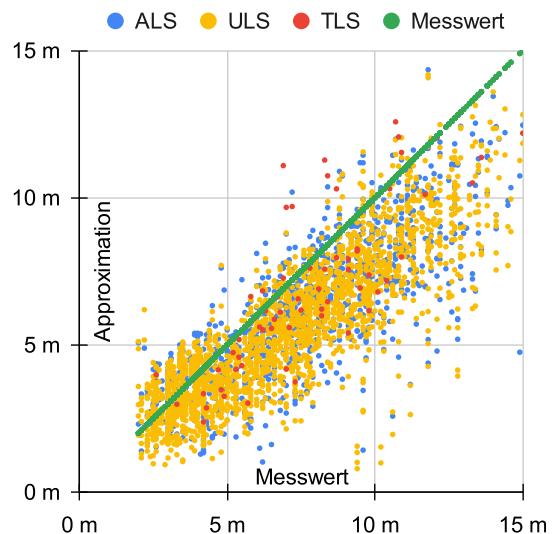
(a) Gesamthöhe vom Baum



(b) Stammdurchmesser bei 130 cm



(c) Anfangshöhe der Baumkrone



(d) Durchmesser der Baumkrone

Abbildung 46: Vergleich zwischen den Messwerten und Approximation von den Baumeigenschaften.

Für die Gesamthöhe vom Baum liegen weniger Messwerte vor, wodurch weniger Vergleiche mit der Approximation möglich sind. Die Approximation für die Baumhöhe ist mit den ALS-, ULS- und TLS-Daten möglich, weil die Gesamthöhe gesucht wird, welche unabhängig von der Punktdichte berechnet werden kann.

Die Berechnung vom Stammdurchmesser funktioniert für die TLS-Daten am besten. Der Stamm wird als Kreis approximiert, wodurch die berechneten Werte kleiner als die gemessenen Werte sind. Bei den ULS-Daten ist eine Korrelation zu sehen, aber die Ergebnisse weichen stark von den gemessenen Werten ab. Mit den ALS-Daten kann der Stammdurchmesser nicht berechnet werden. Bei vielen Punktwolken waren zu wenig Datenpunkte im verwendeten Bereich für die Berechnung, wodurch der Standardwert von 50 cm verwendet wurde.

Auch die Berechnung von der Anfangshöhe der Baumkrone funktioniert mit den TLS-Daten am besten. Mit den ALS- und den ULS-Daten ist eine Approximation möglich, wobei die Ergebnisse bei den ALS Daten weiter von den gemessenen Werten abweichen.

Für die Berechnung vom Durchmesser der Baumkrone sind die ALS-, ULS- und TLS-Daten geeignet. Durch die Approximation der Baumform als Kreis ist der berechnete Wert kleiner als der gemessene Wert. Bei den gemessenen Werten würde der Durchschnitt zwischen der größten Ausdehnung und zugehörigen orthogonalen Ausdehnung bestimmt, wodurch die Baumform als Ellipse approximiert wird. Der Radius vom Kreis mit gleichem Umfang wie die Ellipse ist kleiner, wodurch der systematische Fehler entsteht.

9 Fazit

9.1 Segmentierung

Die Segmentierung unterteilt die Punkte in einzelne Bäume. Wenn die Kronen der Bäume klar getrennte Spitzen haben, werden diese ohne Probleme unterteilt. Dadurch werden manche Waldgebiete gut segmentiert, aber je näher die Kronen der Bäume zueinander sind, desto wahrscheinlicher werden mehrere Bäume zu einem Segment zusammengefasst. Vor der Segmentierung muss der Mindestabstand zwischen Segmenten und die Breite der Scheiben festgelegt werden. Die Parameter müssen passend für den Datensatz gewählt werden, was eine Anpassungsmöglichkeit, aber auch eine Fehlerquelle ergibt.

Die bereits existierende Segmentierung vom Datensatz unterteilt die Punktwolken besser für die einzelnen Bäume ([H. Weiser u. a. 2022](#)). Diese würde nicht nur mit einzelnen Datensätzen durchgeführt, sondern mit einer Kombination der verfügbaren Datensätze für ein Gebiet.

9.2 Analyse

Bei der Analyse von einem Baum werden Daten für jeden Punkt im Baum und für den gesamten Baum berechnet. Für die einzelnen Punkte werden Punktgröße, Normale für die Visualisierung und die lokale Krümmung problemlos berechnet. Die Berechnung von der Ausdehnung für eine bestimmte Höhe vom Baum funktioniert für die meisten Bereiche, wird aber durch Punkte, welche nicht zum Baum gehören stark beeinflusst. Dadurch ist die Ausdehnung stark von der Qualität der Segmentierung abhängig.

Die charakteristischen Eigenschaften vom Baum können mit den genaueren TLS-Daten abgeschätzt werden, haben aber noch systematische Fehler, welche das Ergebnis verfälschen. Mit den ALS- und ULS-Daten werden größere Gebiete abgedeckt, dafür sind die berechneten Eigenschaften ungenauer. Besonders die Berechnung vom Durchmesser vom Stamm ist nur mit den TLS-Daten möglich. Mit den ALS- und ULS-Daten können die Werte für die Baumhöhe und die Baumkrone abgeschätzt werden, weil diese Werte auch mit einer geringeren Punktdichte berechnet werden können. Für Punktwolken mit geringer Dichte oder aus der Luft aufgenommen existieren besonders wenig Punkte unterhalb der Baumkrone, wodurch keine Approximation vom Baumstamm möglich ist.

9.3 Visualisierung

Die Software ermöglicht den Übergang von den Punktdaten ohne weitere Informationen zu einer interaktiven Visualisierung vom Waldgebiet. Dadurch ist ein Überblick über das gescannte Waldgebiet und einzelne Bäume möglich.

Die Triangulierung berechnet ein Mesh für die Segmente, welches von der Visualisierung angezeigt werden kann. Unterschiedlich zu anderer 3D-Render-Software,

kann das Mesh mit den berechneten Punkteigenschaften als Farbinformationen kombiniert werden.

Die Visualisierung ermöglicht eine interaktive Darstellung der Daten. Im Gegensatz zu LAStools ([Hug, Krzystek, und Fuchs 2004](#)) werden Datenpunkte nicht mit einer festen Größe, sondern durch einen orientierten Kreis mit variablem Radius angezeigt. Dadurch entstehen keine Lücken zwischen den Datenpunkten, wenn diese eine geringere Dichte haben oder die Entfernung zur Kamera gering ist. Ein Vergleich ist in [Abbildung 47](#) gegeben. Beim LASviewer sind die Baumkronen weit von den Messpunkten schwer zu sehen, weil weniger Datenpunkte existieren.

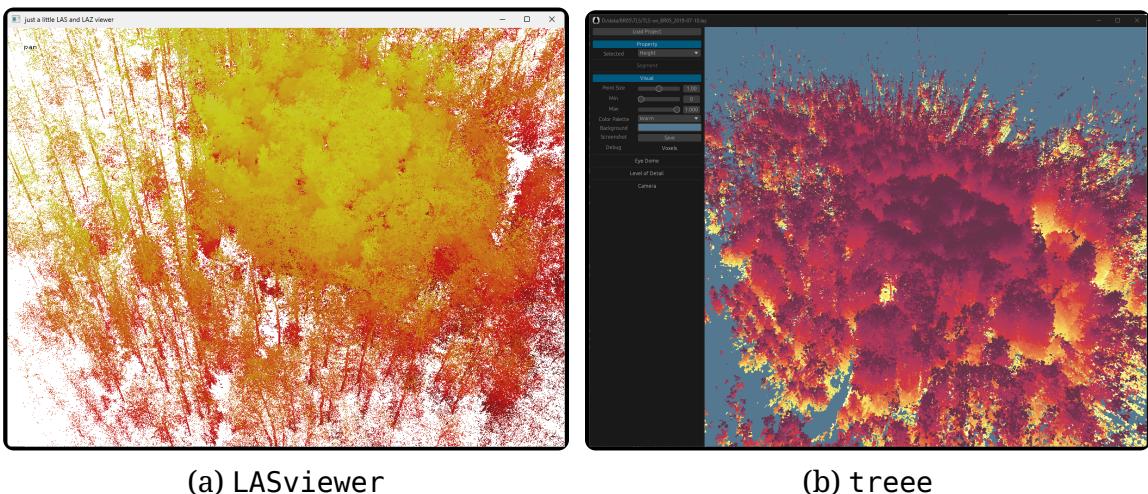


Abbildung 47: Vergleich zwischen den Visualisierungen von LASviewer und treeee.

Für größere Datensätze zeigt LAStools nur eine vorher festgelegte Anzahl von zufällig ausgewählten Punkten. Je größer die Anzahl, desto länger wird für das Rendern der Punkte benötigt, wodurch für große Datensätze nicht alle Daten gerendert werden oder das Rendern länger dauert und die Navigation erschwert. Die Berechnung der Detailstufen benötigen einen Vorverarbeitungsschritt, dafür kann der komplette Datensatz interaktiv angezeigt werden.

9.4 Ausblick

Momentan werden die ermittelten Daten nur für die Visualisierung verwendet. In der `project.json` sind die charakteristischen Eigenschaften für die Segmente gespeichert, aber auch Daten für die Visualisierung. Durch eine Trennung wird eine automatische Weiterverarbeitung der berechneten Eigenschaften erleichtert.

Für jeden Baum wird abhängig von der Höhe die horizontale Ausdehnung bestimmt. Ein Beispiel für die Daten ist in [Abbildung 48](#) gegeben. Die Verteilung kann als Basis für die Baumform benutzt werden, womit zum Beispiel eine Schätzung für die zugehörige Spezies gemacht werden kann.

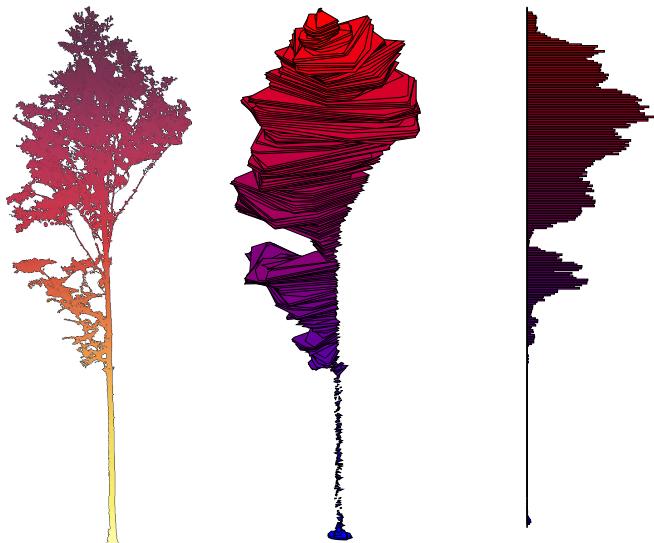


Abbildung 48: Horizontale Scheiben für einen Baum mit der zugehörigen Fläche für jede Scheibe.

Vor der Visualisierung müssen die Daten importiert werden. Je größer die Datenmenge, desto länger dauert der Import und während des Imports können die Daten noch nicht inspiziert werden. Die Möglichkeit die Zwischenergebnisse vom Importprozess anzuzeigen würde das Anpassen von Importparametern erleichtern und die Zeit verringert, ab der die ersten Ergebnisse sichtbar sind.

Der Importer unterstützt momentan nur Dateien im LASzip-Format, wodurch Daten in anderen Formaten nicht verwendet werden können oder zuerst konvertiert werden müssen. Durch andere Importformate kann die Verwendung erleichtert werden.

Die Visualisierung kann Punktwolken auch aus anderen Quellen als Waldgebiete anzeigen, ist aber stark an diesen Verwendungszweck angepasst. Durch einen zusätzlichen Importer, welcher für beliebige Datensätze geeignet ist kann die Visualisierung vielseitiger benutzt werden.

10 Appendix

10.1 Glossar

Koordinatensystem ist eine Menge von Achsen, mit den eine Position genau beschrieben werden kann. Für kartesische Koordinaten ist die x-Achse nach rechts, die y-Achse nach oben und die z-Achse nach hinten orientiert.

Punkt ist die Kombination von einer dreidimensionalen Position und zusätzlichen Informationen.

Punktwolke ist eine Menge von Punkten. Für alle Punkte sind die gleichen zusätzlichen Informationen vorhanden.

Normale ist ein normalisierter dreidimensionaler Vektor, welcher die Orientierung einer Oberfläche von einem Objekt angibt. Der Vektor ist dabei orthogonal zur Oberfläche, kann aber in das Objekt oder aus dem Objekt gerichtet sein.

Voxel ist ein Würfel im dreidimensionalen Raum. Die Position und Größe vom Voxel kann explizit abgespeichert oder relativ zu den umliegenden Voxeln bestimmt werden.

Tree ist eine Datenstruktur, bestehend aus Knoten, welche wiederum Kinderknoten haben können. Die Knoten selber können weitere Informationen enthalten. Die Knoten sind eindeutig sortiert, wodurch ein Knoten niemals Kinderknoten oder indirekter Kinderknoten von sich selbst ist.

Octree ist eine Tree, bei dem ein Knoten acht Kinderknoten haben kann. Mit einem Octree kann ein Voxel aufgeteilt werden. Jeder Knoten gehört dabei zu einem Voxel, welcher gleichmäßig mit den Kinderknoten weiter unterteilt wird.

Leaf-Knoten ist ein Knoten, welcher keine weiteren Kinderknoten hat. Für Punktwolken gehört jeder Punkt zu genau einem Leaf-Knoten.

Branch-Knoten ist ein Knoten, welcher weitere Kinderknoten hat.

Root-Knoten ist der erste Knoten im Tree, alle anderen Knoten sind direkte oder indirekte Kinderknoten vom Root-Knoten.

KD-Baum ist eine Datenstruktur, um im k -dimensionalen Raum für eine Position die nächsten Punkte zu bestimmen.

Greedy-Algorithmus ist eine Kategorie von Algorithmen, bei denen das Ergebnis schrittweise berechnet wird. Bei jedem Schritt wird mit den momentanen Informationen die beste Entscheidung getroffen, wodurch das Ergebnis schnell, aber meist nicht global optimal berechnet wird.

10.2 KD-Baum

Für eine Menge von Punkten kann ein KD-Baum berechnet werden. Mit diesem kann effizient bestimmt werden, welche Punkte innerhalb einer Kugel mit beliebiger Position und Radius liegen. Ein Beispiel für einen KD-Baum ist in [Abbildung 49](#) gegeben. Für jede Unterteilung ist die Trenngerade mit weniger Punkten gezeichnet. Weil der rote Kreis vollständig links der ersten Unterteilung ist, müssen die Punkte rechts nicht betrachtet werden.

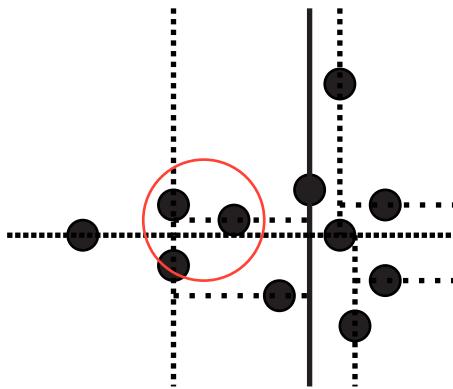


Abbildung 49: KD-Baum für Punkte in 2D.

10.2.1 Konstruktion

Für die Konstruktion von einem KD-Baum werden nur die Positionen der Punkte benötigt.

Zuerst wird für die Punkte entlang der ersten Dimension der Median bestimmt. Dabei wird der *Quickselect*-Algorithmus ([Hoare 1961](#)) verwendet. Der Median hat als Index die halbe Anzahl der Punkte. Ist die Anzahl der Punkte ungerade, so kann der Index auf- oder abgerundet werden, solange bei der Suche die gleiche Strategie verwendet wird. Wie beim *Quicksort*-Algorithmus wird ein beliebiges Pivot-Element ausgewählt, mit diesem die Positionen entlang der Dimension unterteilt werden. Die Positionen werden einmal iteriert und kleinere Positionen vor dem Pivot und größere Positionen nach dem Pivot verschoben. Der Pivot ist am Index, wo es in der sortierten Liste wäre. Um den Median zu finden, wird nur der Teil von den Punkten weiter betrachtet, welcher den Median beinhaltet. Die Unterteilung wird so lange wiederholt, bis der Bereich nur noch einem Punkt enthält und der Median bekannt ist.

Durch den *Quickselect*-Algorithmus sind die Positionen nach der Bestimmung vom Median in kleine und größere Positionen unterteilt. Die Ebene durch den Punkt teilt dabei den Raum und alle Punkte mit kleinerem Index liegen auf der anderen Seite als die Punkte mit größerem Index. Die beiden Hälften werden in der gleichen Weise unterteilt. Dabei wird die nächste, beziehungsweise für die letzte Dimension wieder die erste Dimension verwendet.

Der zugehörige Binärbaum muss nicht gespeichert werden, da dieser implizit entsteht. Für jede Unterteilung wird die Position vom Median gespeichert, weil diese für die Suchanfragen benötigt werden.

10.2.2 Suche mit festem Radius

Bei dieser Suchanfrage werden alle Punkte gesucht, welche in einer Kugel mit bekanntem Zentrum und Radius liegen. Von dem Root-Knoten aus wird der Baum dabei durchsucht. Bei jeder Unterteilung wird dabei überprüft, wie die Kugel zur teilenden Ebene liegt. Ist die Kugel vollständig auf einer Seite, so muss nur der zugehörige Teilbaum weiter durchsucht werden. Liegen Teile der Kugel auf beiden Seiten, so müssen beide Teilbäume weiter durchsucht werden.

Dabei wird bei jeder Unterteilung überprüft, ob der zugehörige Punkt in der Kugel liegt und wird gegebenenfalls zum Ergebnis hinzugefügt.

Mit der gleichen Methode kann effizient bestimmt werden, ob eine Kugel leer ist. Dafür wird beim ersten gefundenen Punkt in der Kugel die Suche abgebrochen.

10.2.3 Suche mit fester Anzahl

Bei dieser Suchanfrage wird für eine feste Anzahl k die k -nächsten Punkte für ein bestimmtes Zentrum gesucht. Dafür werden die momentan k -nächsten Punkte gespeichert und nach Entfernung sortiert. Die Entfernung zum k -ten Punkt wird als Maximaldistanz verwendet. Solange noch nicht k Punkte gefunden sind, kann unendlich oder ein beliebiger Wert als Maximalabstand verwendet werden.

Es wird wieder vom Root-Knoten aus der Baum durchsucht. Bei jeder Unterteilung wird zuerst in der Hälfte vom Baum weiter gesucht, die das Zentrum enthält. Dabei werden die Punkte zu den besten Punkten hinzugefügt, die näher am Zentrum als die Maximaldistanz liegen. Sobald k Punkte gefunden sind, wird dadurch die Maximaldistanz kleiner, weil der Punkte mit der alten Maximaldistanz nicht mehr zu den k -nächsten Punkten gehört.

Nachdem ein Teilbaum vollständig durchsucht ist, wird überprüft, ob Punkte aus dem anderen Teilbaum näher am Zentrum liegen können. Dafür wird der Abstand vom Zentrum zur Ebene bestimmt. Ist der Abstand größer als die momentane Maximaldistanz, so kann kein Punkt näher am Zentrum liegen und der Teilbaum muss nicht weiter betrachtet werden.

10.2.4 Verbesserte Suche für kleine Teilbäume

Sobald ein Teilbaum nur noch wenige Punkte beinhaltet, ist es langsamer zu überprüfen, welche Punkte näher sein können, als alle Punkte zu betrachten. Deshalb wird für Teilbäume mit weniger als 32 Punkten die Punkte linear iteriert, wodurch Rekursion vermieden wird.

10.3 Baum (Datenstruktur)

Ein Baum ermöglichen räumlich dünnbesetzte Daten effizient zu speichern. Dafür wird der Raum unterteilt, und nur für Bereiche mit Daten weitere Knoten gespeichert.

10.3.1 Konstruktion

Zuerst wird die räumliche Ausdehnung der Daten bestimmt. Dieser Bereich wird dem Root-Knoten zugeordnet. Solange noch zu viele Datenwerte im Bereich von einem Knoten liegen, wird dieser weiter unterteilt. Dafür wird der zugehörige Bereich entlang aller Dimensionen halbiert und jeder Teilbereich einem Kinderknoten zugeordnet. Bei einem Quadtree in 2D entstehen dadurch vier Kinderknoten und bei einem Octree in 3D acht Kinderknoten. Die Daten vom Knoten werden auf die Kinderknoten aufgeteilt. Der unterteilte Knoten speichert stattdessen die Kinderknoten.

In [Abbildung 50](#) und [Abbildung 51](#) sind Beispiele in 2D und 3D gegeben.

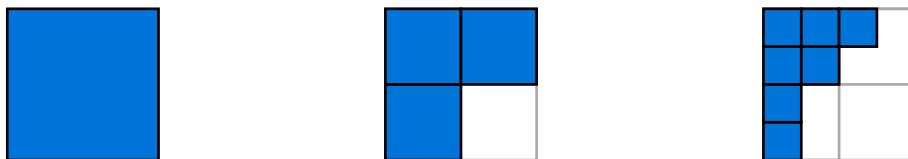


Abbildung 50: Unterschiedliche Stufen von einem Quadtree.

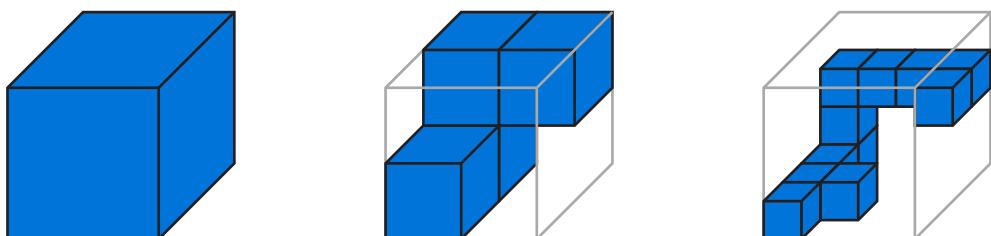


Abbildung 51: Unterschiedliche Stufen von einem Octree.

10.3.2 Suchanfrage

Bei einer Suchanfrage wird vom Root-Knoten aus der Leaf-Knoten gesucht, welcher die gesuchte Position enthält. Am Anfang wird der Root-Knoten als momentaner Knoten verwendet. Solange der momentane Knoten ein Branch-Knoten ist, wird der Kinderknoten gesucht, welcher die Position enthält und als neuer momentaner Knoten verwendet. Wenn der momentane Knoten ein Leaf-Knoten ist, wurde der gesuchte Leaf-Knoten gefunden.

10.4 Systemeigenschaften

Betriebssystem	Windows 11
Prozessor	Intel(R) Core(TM) i7-9700KF CPU @ 3.60 GHz
Grafikkarte	NVIDIA GeForce GTX 1660 SUPER
RAM	2 x G.Skill F4-3200C16-8GIS
Festplatte	SanDisk SSD PLUS 2000GB

Tabelle 7: Überblick über die Systemeigenschaften

Physische Kerne	8
Logische Kerne	8
Maximale Taktrate	4,6 GHz
Cachegröße (L1, L2, L3)	512 KiB, 2 MiB, 12 MiB

Tabelle 8: Prozessoreigenschaften

Basistaktung	1530 Mhz
Boost-Taktung	1785 Mhz
Speicherkonfiguration	6 GB GDDR6
Speicherschnittstelle	192 Bit

Tabelle 9: Grafikkarteneigenschaften

Größe	2 × 8 GiB
Taktrate	2133 MHz

Tabelle 10: RAM-Eigenschaften

Aktion	1 GiB	5 GiB	10 GiB
Lesen	776 MiB/s	384 MiB/s	218 MiB/s
Schreiben	1739 MiB/s	1929 MiB/s	270 MiB/s

Tabelle 11: Sequenzielle Lese- und Schreibgeschwindigkeit der Festplatte mit 4 KiB Blöcken für unterschiedliche Dateigrößen.

10.5 Messwerte vom Import

Datensatz	Datei	Daten (Punkte)	Segmente (Punkte)	Detailstufen (Punkte)
ALS-BR01	ALS-on_BR01_2019-07-05_300m	12531758	12508612	5383527
ALS-BR02	ALS-on_BR02_2019-07-05_200m	5469363	5457090	2248915
ALS-BR03	ALS-on_BR03_2019-07-05_300m	12284905	12235917	6268300
ALS-BR04	ALS-on_BR04_2019-07-05_140m	2638216	2629231	1225097
ALS-BR05	ALS-on_BR05_2019-07-05_300m	13401630	13362033	5904834
ALS-BR06	ALS-on_BR06_2019-07-05_200m	6269955	6260421	2264327
ALS-BR07	ALS-on_BR07_2019-07-05_140m	3196739	3183756	1494056
ALS-BR08	ALS-on_BR08_2019-07-05_140m	2871871	2860173	1437912
ALS-KA09	ALS-on_KA09_2019-07-05_300m	14536939	14531527	6574613
ALS-KA10	ALS-on_KA10_2019-07-05_300m	13413120	13400728	6616077
ALS-KA11	ALS-on_KA11_2019-07-05_300m	14840932	14834281	7197589
ALS-SP02	ALS-on_SP02_2019-07-05_140m	2810265	2803582	1330103
ULS-BR01	ULS-off_BR01_2019-12-04	52179533	52149914	21465668
ULS-BR02	ULS-on_BR02_2019-08-24	41555427	41431426	19737224
ULS-BR03	ULS-on_BR0308_2019-08-24	83344946	83193255	37410691
ULS-BR05	ULS-off_BR05_2020-03-26	52169435	52118747	21484710
ULS-BR06	ULS-off_BR06_2020-03-27	60182129	60117592	20480701
ULS-BR07	ULS-on_BR07_2019-08-24	46833772	46708265	18287517
ULS-BR08	ULS-off_BR08_2020-03-31	66483369	66432982	26880086
ULS-KA09	ULS-on_KA09_2019-09-13	50863340	50723815	22030809
ULS-KA10	ULS-on_KA10_2019-09-13	48167924	48030861	23080707
ULS-KA11	ULS-on_KA11_2019-09-06	58549518	58459850	26676462
ULS-SP02	ULS-on_SP02_2019-09-03	30811866	30761609	12827262
TLS-BR01	TLS-on_BR01_2019-07-03	349902555	349880861	101402285
TLS-BR02	TLS-on_BR02_2019-06-13	206306919	206277122	50951743
TLS-BR03	TLS-on_BR03_2019-06-04_B	71067156	71056700	18813597
TLS-BR04	TLS-on_BR04_2019-07-04	326741799	326718896	91369208
TLS-BR05	TLS-on_BR05_2019-07-10	418794802	418764606	119672624
TLS-BR06	TLS-on_BR06_2019-07-22_B	124075064	124048349	25323813
TLS-BR07	TLS-on_BR07_2019-07-19_B	308965997	308937292	80092920
TLS-BR08	TLS-on_BR08_2019-07-23	417738648	417716948	111295554
TLS-KA09	TLS-on_KA09_2019-08-20_A	261723907	261705346	74651193
TLS-KA10	TLS-on_KA10_2019-07-30_B	283197972	283176980	81713068
TLS-KA11	TLS-on_KA11_2019-09-03_B	273795041	273770543	61803916
TLS-SP02	TLS-on_SP02_2019-08-23_B	252267714	252246056	77190719

Tabelle 12: Messwerte (Verwendete Datei und Punktanzahl).

Datensatz	Segmente (Anzahl)	Laden (Sekunden)	Segmentierung (Sekunden)	Analyse (Sekunden)	Detailstufen (Sekunden)
ALS-BR01	4390	1.861	3.446	7.069	3.796
ALS-BR02	2634	2.758	1.387	3.223	3.244
ALS-BR03	5740	2.389	5.456	8.657	7.830
ALS-BR04	1596	0.395	0.452	1.439	0.493
ALS-BR05	4911	2.237	4.222	8.848	3.744
ALS-BR06	2274	1.389	1.489	3.975	4.679
ALS-BR07	1294	0.760	0.462	2.341	0.536
ALS-BR08	1275	1.340	0.644	1.846	2.656
ALS-KA09	4585	3.414	20.675	10.224	5.572
ALS-KA10	4499	2.287	20.146	9.478	5.303
ALS-KA11	5835	2.534	31.228	9.595	6.172
ALS-SP02	1456	0.698	0.695	1.842	0.532
ULS-BR01	2712	14.805	6.842	50.851	42.392
ULS-BR02	5248	16.693	9.850	37.769	23.975
ULS-BR03	7266	11.356	24.106	92.917	61.733
ULS-BR05	4170	9.181	8.120	52.270	31.355
ULS-BR06	5909	9.932	13.340	57.183	38.787
ULS-BR07	6227	17.608	10.173	41.496	36.861
ULS-BR08	6036	12.952	21.606	64.969	51.375
ULS-KA09	6007	19.923	34.091	44.833	39.613
ULS-KA10	5638	10.368547	28.78788	46.987415	40.57933
ULS-KA11	5834	11.913675	39.09122	47.891563	42.77556
ULS-SP02	2936	6.447726	7.2568164	27.668728	22.448013
TLS-BR01	1122	56.536	25.621	850.015	454.944
TLS-BR02	2955	37.027	18.922	381.628	248.833
TLS-BR03	714	11.495	5.243	121.244	52.736
TLS-BR04	1813	59.840	23.269	660.753	469.446
TLS-BR05	2967	81.245	38.454	970.322	657.404
TLS-BR06	1898	18.813	8.927	194.271	109.483
TLS-BR07	2627	51.777	25.080	635.522	452.381
TLS-BR08	1937	78.780	33.562	1060.721	734.373
TLS-KA09	1261	38.988	22.069	562.831	346.010
TLS-KA10	1380	47.884	33.696	613.597	422.592
TLS-KA11	1824	43.516	26.665	706.204	393.059
TLS-SP02	1558	36.764	19.562	605.249	327.259

Tabelle 13: Messwerte (Anzahl Segmente und Importgeschwindigkeit).

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbstständig durchgeführt und abgefasst habe. Quellen, Literatur und Hilfsmittel, die von mir genutzt wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Ort: _____

Datum: _____

Unterschrift: _____

Bibliographie

- Bernardini, F., J. Mittleman, H. Rushmeier, C. Silva, und G. Taubin. 1999. „The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction“. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 5 (4): 349–59. <https://doi.org/10.1109/2945.817351>
- Burt, Andrew, Mathias Disney, und Kim Calders. 2019. „Extracting individual trees from lidar point clouds using treeseg“. *Methods in Ecology and Evolution* 10 (3): 438–45. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13121>
- Dalponte, Michele, Lorenzo Bruzzone, und Damiano Gianelle. 2012. „Tree species classification in the Southern Alps based on the fusion of very high geometrical resolution multispectral/hyperspectral images and LiDAR data“. *Remote Sensing of Environment* 123: 258–70. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.013>
- Disney, Mathias. 2019. „Terrestrial LiDAR: a three-dimensional revolution in how we look at trees“. *New Phytologist* 222 (4): 1736–41. <https://doi.org/10.1111/nph.15517>
- Donager, Jonathon J, Andrew J Sánchez Meador, und Ryan C Blackburn. 2021. „Adjudicating perspectives on forest structure: how do airborne, terrestrial, and mobile lidar-derived estimates compare?“. *Remote Sensing* 13 (12): 2297–98
- Ghosh, Aniruddha, Fabian Ewald Fassnacht, P.K. Joshi, und Barbara Koch. 2014. „A framework for mapping tree species combining hyperspectral and LiDAR data: Role of selected classifiers and sensor across three spatial scales“. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 26: 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.017>
- Goodbody, Tristan R. H., Nicholas C. Coops, und Joanne C. White. 2019. „Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions“. *Current Forestry Reports* 5 (2): 55–75. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>
- Graham, Lewis. 2012. „The LAS 1.4 specification“. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 78 (2): 93–102
- Guo, Jianwei, Shibiao Xu, Dong-Ming Yan, Zhanglin Cheng, Marc Jaeger, und Xiaopeng Zhang. 2020. „Realistic Procedural Plant Modeling from Multiple View Images“. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 26 (2): 1372–84. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2869784>
- Hackenberg, Jan, Heinrich Spiecker, Kim Calders, Mathias Disney, und Pasi Raumonen. 2015. „SimpleTree —An Efficient Open Source Tool to Build Tree Models from TLS Clouds“. *Forests* 6 (11): 4245–94. <https://doi.org/10.3390/f6114245>
- Hoare, C. A. R. 1961. „Algorithm 65: Find“. *Commun. ACM* 4 (7): 321–22. <https://doi.org/10.1145/366622.366647>
- Holmgren, Johan, und Åsa Persson. 2004. „Identifying species of individual trees using airborne laser scanner“. *Remote Sensing of Environment* 90 (4): 415–23. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00140-8)

- Hug, C., Peter Krzystek, und Wolfgang Fuchs. 2004. „Advanced Lidar Data Processing with Lastools“. In . <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14167994>
- Isenburg, Martin. 2013. „LASzip: lossless compression of LiDAR data“. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 79 (2): 209–17
- Liu, Yanchao, Jianwei Guo, Bedrich Benes, Oliver Deussen, Xiaopeng Zhang, und Hui Huang. 2021. „TreePartNet: neural decomposition of point clouds for 3D tree reconstruction“. *ACM Trans. Graph.* 40 (6). <https://doi.org/10.1145/3478513.3480486>
- Majercik, Alexander, Cyril Crassin, Peter Shirley, und Morgan McGuire. 2018. „A Ray-Box Intersection Algorithm and Efficient Dynamic Voxel Rendering“. *Journal of Computer Graphics Techniques (JCGT)* 7 (3): 66–81. <http://jcgtrg.org/published/0007/03/04/>
- Othmani, Ahlem, Lew F.C. Lew Yan Voon, Christophe Stoltz, und Alexandre Piboule. 2013. „Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory“. *Pattern Recognition Letters* 34 (16): 2144–50. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2013.08.004>
- Proudman, Alexander, Milad Ramezani, Sundara Tejaswi Digumarti, Nived Chebrolu, und Maurice Fallon. 2022. „Towards real-time forest inventory using handheld LiDAR“. *Robotics and Autonomous Systems* 157: 104240–41. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104240>
- Rivera, Gilberto, Raúl Porras, Rogelio Florencia, und J. Patricia Sánchez-Solís. 2023. „LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances“. *Computers and Electronics in Agriculture* 207: 107737–38. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107737>
- Schütz, Markus, Stefan Ohrhallinger, und Michael Wimmer. 2020. „Fast Out-of-Core Octree Generation for Massive Point Clouds“. *Computer Graphics Forum* 39 (7): 155–67. <https://doi.org/10.1111/cgf.14134>
- Suzuki, Taro, Shunichi Shiozawa, Atsushi Yamaba, und Yoshiharu Amano. 2021. „Forest Data Collection by UAV Lidar-Based 3D Mapping: Segmentation of Individual Tree Information from 3D Point Clouds“. *International Journal of Automation Technology* 15: 313–23. <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0313>
- Tompalski, Piotr, Nicholas C. Coops, Joanne C. White, Tristan R.H. Goodbody, Chris R. Hennigar, Michael A. Wulder, Jarosław Socha, und Murray E. Woods. 2021. „Estimating Changes in Forest Attributes and Enhancing Growth Projections: a Review of Existing Approaches and Future Directions Using Airborne 3D Point Cloud Data“. *Current Forestry Reports* 7 (1): 1–24. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00135-w>
- Torr, P.H.S., und A. Zisserman. 2000. „MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry“. *Computer Vision and Image Understanding* 78 (1): 138–56. <https://doi.org/10.1006/cviu.1999.0832>

- Wang, Ruisheng, Jiju Peethambaran, und Dong Chen. 2018. „LiDAR Point Clouds to 3-D Urban Models: A Review“. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11 (2): 606–27. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2781132>
- Weiser, H. u. a. 2022. „Individual tree point clouds and tree measurements from multi-platform laser scanning in German forests“. *Earth System Science Data* 14 (7): 2989–3012. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2989-2022>
- Weiser, Hannah u. a. 2022. „Terrestrial, UAV-borne, and airborne laser scanning point clouds of central European forest plots, Germany, with extracted individual trees and manual forest inventory measurements“. PANGAEA. 2022. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.942856>
- White, Joanne, Michael Wulder, Mikko Vastaranta, Nicholas Coops, Doug Pitt, und Murray Woods. 2013. „The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning“. *Forests* 4 (3): 518–36. <https://doi.org/10.3390/f4030518>
- Zhang, Xiaopeng, Hongjun Li, Mingrui Dai, Wei Ma, und Long Quan. 2014. „Data-Driven Synthetic Modeling of Trees“. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 20 (9): 1214–26. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2014.2316001>