



Technische Universität München  
School of Engineering and Design  
Department Aerospace and Geodesy  
Photogrammetrie und Fernerkundung

# Automatisierte Generierung eines Baumkatasters aus Punktwolken in unterschiedlichen urbanen Umgebungen

Sabine Zagst, B.Sc.

Master's Thesis

**Bearbeitung:** 15. 11. 2022 - 15.06.2023

**Studiengang:** Geodäsie und Geoinformation (Master)

**Betreuer:** Philipp-Roman Hirt, M.Sc.



---

# Abstract

---

Tree cadastres have an important role in urban areas for storing and managing the tree population. To obtain the basic data such as position, breast height diameter, tree height and crown diameter of trees, often complex manual measurement methods are necessary. In order to facilitate this process, this master thesis investigates to what extent the generation of a tree cadastre from point clouds in different urban environments can be automated and made usable for simulations in 3D city models. For this purpose, a methodology is developed which automatically extracts tree parameters from point clouds in different urban environments and examines them on the basis of a street and a park. Furthermore, an interface between the resulting tree cadastre and a semantic 3D city model is created by generating 3D models in the standardized CityGML format from the extracted tree parameters.

The methodology presented in this master thesis delivers results for all tree parameters mentioned above. All of them, except for the diameter of the breast height, meet the accuracy requirements of a tree cadastre. Limitations in the automation arise from the different properties of the various point clouds, which make an individual choice of some program parameters necessary.



---

# Kurzfassung

---

Baumkataster haben im urbanen Raum eine wichtige Bedeutung zur Speicherung und Verwaltung des Baumbestands. Zur Gewinnung der Stammdaten wie Position, Brusthöhendurchmesser, Baumhöhe und Kronendurchmesser der Bäume sind oft aufwendige manuelle Messmethoden nötig. Um dieses Verfahren zu erleichtern, wird in dieser Masterarbeit untersucht, inwiefern und wie weit sich die Generierung eines Baumkatasters aus Punktwolken in unterschiedlichen urbanen Umgebungen automatisieren und für Simulationen in 3D-Stadtmodellen nutzbar machen lässt. Dafür wird eine Methodik entwickelt, welche automatisiert Baumparameter aus Punktwolken in unterschiedlichen urbanen Umgebungen extrahiert und anhand eines Straßenzuges und einer Parkanlage untersucht. Darüber hinaus wird eine Schnittstelle zwischen dem resultierenden Baumkataster und einem semantischen 3D-Stadtmodell geschaffen, indem aus den gewonnenen Baumparametern 3D-Modelle im standardisierten CityGML-Format erzeugt werden.

Die in dieser Masterarbeit vorgestellte Methodik liefert dabei für alle zuvor genannten Baumparameter außer des Brusthöhendurchmessers Ergebnisse, welche den Genauigkeitsanforderungen eines Baumkatasters entsprechen. Einschränkungen bei der Automatisierung entstehen durch die unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Punktwolken, welche eine individuelle Wahl einzelner Programmparameter nötig machen.



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Abstract</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>Danksagung</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Motivation und Problemstellung</b>	<b>1</b>
1.1 Forschungsfragen . . . . .	3
1.2 Zielsetzung . . . . .	4
<b>2 Theoretischer Hintergrund</b>	<b>5</b>
2.1 Aktueller Forschungsstand . . . . .	5
2.2 Baumkataster . . . . .	9
2.2.1 Anwendungsaufgaben . . . . .	11
2.2.2 Kosten . . . . .	13
2.2.3 Rechtliche Grundlagen . . . . .	13
2.3 Baumparameter . . . . .	14
2.3.1 Brusthöhdurchmesser (BHD) . . . . .	14
2.3.2 Baumhöhe . . . . .	16
2.3.3 Kronendurchmesser . . . . .	17
2.4 Cloth Simulation Filter (CSF) . . . . .	17
2.5 Zirkulare Hough-Transformation . . . . .	21
2.6 City Geography Markup Language (CityGML) . . . . .	22
2.6.1 Vegetationsmodul . . . . .	24
2.6.2 Geometriemodell . . . . .	24
<b>3 Methodik und Implementierung</b>	<b>27</b>
3.1 Datenaufnahme und Vorverarbeitung . . . . .	27

3.2	Bodenverarbeitung . . . . .	29
3.3	Extraktion von Baumparametern . . . . .	32
3.3.1	Reduzierung der Punktwolke in den 2D-Raum . . . . .	33
3.3.2	Brusthöhendurchmesser und Baumpositionen . . . . .	35
3.3.3	Baumhöhen und Baumkronendurchmesser . . . . .	39
3.3.4	Verifikation der segmentierten Baumobjekte . . . . .	39
3.3.5	Genauigkeitserwartung . . . . .	40
3.4	Alternativer Ansatz zur Bestimmung von Brusthöhendurchmessern . . . . .	41
3.5	Konvertierung und semantische Darstellung in CityGML . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Untersuchungsgebiete, Datenaufnahme und verwendete Datensätze</b>	<b>47</b>
4.1	Arcisstraße in München . . . . .	47
4.1.1	Datenaufnahme und Datensätze mittels Mobile Laser Scanning . . . . .	47
4.1.2	Referenzdaten durch herkömmliche Dendrometrie . . . . .	52
4.2	Pasinger Kloostergarten . . . . .	54
4.3	Semantisches 3D-Gebäudemodell der bayerischen Vermessungsverwaltung . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>59</b>
5.1	Vorverarbeitung . . . . .	63
5.2	Bodenverarbeitung . . . . .	64
5.3	Anzahl detektierter Bäume . . . . .	68
5.4	Extrahierte Baumparameter . . . . .	73
5.5	Baumkataster im CityGML-Format . . . . .	77
5.6	Laufzeitbetrachtung . . . . .	78
5.7	Vergleich zur zugrundeliegenden Bachelorarbeit . . . . .	80
5.8	Vergleich zwischen urbanem Park und Straßenzug . . . . .	81
5.9	Vergleich zur manuellen Erstellung eines Baumkatasters . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Evaluierung</b>	<b>83</b>
6.1	Detektierte Bäume . . . . .	83
6.2	Baumstandorte . . . . .	87
6.3	Brusthöhendurchmesser (BHD) . . . . .	91
6.4	Baumhöhen . . . . .	93
6.5	Baumkronendurchmesser . . . . .	94
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>95</b>
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>97</b>

---

<b>Literaturverzeichnis</b>	99
<b>A Eidesstattliche Erklärung</b>	105
<b>B Computerspezifikationen</b>	107
<b>C Baumkataster</b>	109
<b>D Methodik</b>	111
<b>E Referenzdaten Arcisstraße</b>	113
<b>F Pasinger Klostergarten</b>	121
<b>G Numerische Ergebnisse</b>	123



---

# Abbildungsverzeichnis

---

2.1	Ergebnisse der Extraktion von Baumparametern aus einem 2D-Rasterbild mittels Bildverarbeitung [Zintl, 2021]. . . . .	8
2.2	Ausschnitt aus dem öffentlich zugänglichen Baumkataster der Stadt Frankfurt am Main [Grünflächenamt Frankfurt am Main, 2022]. . . . .	10
2.3	Ausschnitt aus dem öffentlich zugänglichen Baumkataster der Stadt Hamburg [LGV Hamburg, 2023]. . . . .	11
2.4	Ausschnitt aus dem öffentlich zugänglichen Baumkataster der Stadt Graz in Österreich [Stadtvermessung-Graz, 2023]. . . . .	12
2.5	Bestimmung des Brusthöhendurchmessers. . . . .	15
2.6	Kompakter Laser-Entfernungsmesser und Höhenmesser [Forestry Tools, 2023]. . . . .	17
2.7	Überblick über den CSF. . . . .	18
2.8	Funktionsweise des CSF. . . . .	19
2.9	Zusammenhang zwischen der Hesse'schen Normalform der $x$ - und $y$ -Koordinaten und der $r$ - und $\varphi$ -Koordinaten einer Gerade [Nischwitz et al., 2011]. . . . .	22
2.10	Überblick über die CityGML 3.0 Module [OGC, 2021b]. . . . .	23
2.11	UML-Diagramm des Vegetationsmoduls von CityGML 2.0 [OGC, 2012]. . . . .	25
2.12	UML-Diagramm des Geometriemodells von CityGML 2.0 [OGC, 2012]. . . . .	26
3.1	Entwickelte Methodik als Ablaufdiagramm (eigene Darstellung). . . . .	28
3.2	Darstellungen des Bodenrasters mit medialen Höhenwerten des Südteils der Arcisstraße (eigene Darstellung). . . . .	31
3.3	Veranschaulichung der Bodenprozessierung (eigene Darstellung). . . . .	32
3.4	Entwickelte Methodik zur Extraktion der Baumparameter als Ablaufdiagramm (eigene Darstellung). . . . .	33
3.6	Detaillierte Modellierung eines Baums in CityGML. . . . .	42
3.7	Baummodelle verschiedener Komplexität mit dem CityGML Geometriemodell. [Hurst & Geiger, 2020] . . . . .	43
3.8	FME-Workflow, welcher aus einer csv-Datei mit Baumparametern <i>SolitaryVegetationObjects</i> im CityGML-Format erstellt (Screenshot aus FME Workbench 2022.2.5). . . . .	45

4.1	Untersuchungsgebiete Arcisstraße Nord und Süd an der TUM. . . . .	48
4.2	MLS-Plattform MODISSA. . . . .	50
4.3	Das Stammgelände der TUM als Testgebiet. . . . .	50
4.4	Verwendete Punktwolken. . . . .	51
4.5	Messungen im Testgebiet Arcisstraße im März 2023. . . . .	53
4.6	Untersuchungsgebiet Pasinger Kloostergarten. . . . .	55
4.7	Komponenten des personengetragenen Mobile Laserscanning Systems [Goebel et al., 2023]. . . . .	56
4.8	Verwendete Punktwolke des Pasinger Kloostergartens. . . . .	56
4.9	3D-Stadtmodell bestehend aus LoD2-Gebäudemodellen von Pasing rund um den Kloostergarten. . . . .	57
5.1	Laufzeit des gesamten Extraktionsprozesses der Baumparameter in Abhängigkeit von der Pixelgröße. . . . .	60
5.2	Ergebnis der Bodenverarbeitung der Arcisstraße Süd. . . . .	66
5.3	Ergebnis der Bodenverarbeitung der Arcisstraße Nord. . . . .	66
5.4	Ergebnis der Bodenverarbeitung des Pasinger Kloostergartens. . . . .	67
5.5	Gebietsdefinition des Pasinger Kloostergartens für die Auswertung. . . . .	69
5.6	Gebietsüberblick der Arcisstraße a Süd und b Nord mit eingezeichneten Baumstandorten in grün. . . . .	69
5.7	Ergebnisdiagramm der Anzahl der detektierten Bäume in Abhängigkeit des Parameters <i>num_peaks</i> im Testgebiet Arcisstraße Süd. . . . .	70
5.8	Ergebnisdiagramm der Anzahl der detektierten Bäume in Abhängigkeit des Parameters <i>num_peaks</i> im Testgebiet Arcisstraße Nord. . . . .	71
5.9	Ergebnisdiagramm der Anzahl der detektierten Bäume in Abhängigkeit des Parameters <i>num_peaks</i> im Testgebiet Pasinger Kloostergarten. . . . .	72
5.10	Ergebnis der detektierten Bäume in der Arcisstraße Süd für <i>num_peaks</i> = 45. . . . .	74
5.11	Ergebnis der detektierten Bäume in der Arcisstraße Nord für <i>num_peaks</i> = 45. . . . .	75
5.12	Ergebnis der detektierten Bäume im Pasinger Kloostergarten für <i>num_peaks</i> = 45. . . . .	76
5.13	Ausschnitt aus einer aus dem FME-Workflow resultierenden CityGML-Datei. . . . .	78
5.14	Semantische Darstellung der modellierten Bäume in CityGML in Verbindung mit dem bayerischen 3D-Gebäudemodell. . . . .	79
5.15	Laufzeit des automatisierten Verfahrens für die drei Testgebiete aufgegliedert nach den einzelnen Programmteilen. . . . .	79
6.1	Detektierte Kreise der Hough-Transformation für Baum Nummer 902. . . . .	84
6.2	Exemplarische 25 m Umkreise um zwei Aufnahmepunkte in der Arcisstraße. . . . .	86
6.3	Plot der Baumstandorte in der Arcisstraße Süd. . . . .	87
6.4	Plot der Baumstandorte in der Arcisstraße Nord. . . . .	88

---

6.5	Plot der Lageabweichung in der Arcisstraße Süd. . . . .	89
6.6	Plot der Lageabweichung in der Arcisstraße Nord. . . . .	90
6.7	Differenz zwischen der BHD-Referenzmessung 2023 und 2021 in der Arcisstraße. . . . .	91
6.8	Differenz zwischen dem Ergebnis des automatisierten Verfahrens und der BHD-Referenzmessung 2023 in der Arcisstraße. . . . .	91
6.9	Von der Hough-Transformation detektierte Kreis im BHD-Binärbild. . . . .	92
6.10	Differenz zwischen dem Ergebnis des automatisierten Verfahrens und der Baumhöhen-Referenzmessung 2021 in der Arcisstraße. . . . .	94
C.1	Ausschnitt aus dem öffentlich zugänglichen Baumkataster der Stadt Frankfurt am Main als Tabelle [Grünflächenamt Frankfurt am Main, 2022]. . . . .	110
D.1	Gesamtabbild der entwickelten Methodik (eigene Darstellung) . . . . .	112
E.1	Darstellung der manuell gemessenen Bäume 2021 in der Arcisstraße mit Nummerierung. . . . .	118
E.2	Darstellung der manuell gemessenen Bäume 2023 in der Arcisstraße mit Nummerierung. . . . .	119
F.1	Streuobstwiese im Pasinger Kloostergarten. August 2022 (eigene Aufnahme). . . . .	121
F.2	Insel und Waldgebiet im Pasinger Kloostergarten. August 2022 (eigene Aufnahme). . . . .	121
F.3	Gemüsegarten im Pasinger Kloostergarten. August 2022 (eigene Aufnahme). . . . .	122
F.4	Würminsel mit Inselhaus im Pasinger Kloostergarten. Oktober 2022 (eigene Aufnahme). . . . .	122



---

# Tabellenverzeichnis

---

2.1	CSF-Parameter mit Beschreibung und Standardwerten. Tabelle nach den Angaben in Zhang [oJ] und Qi [2023] erstellt. . . . .	20
5.1	Übersicht über die Parameter des Bildverarbeitungsansatzes zur Extraktion von Baumparametern. . . . .	61
5.2	Auswirkung der nacheinander angewendeten Vorverarbeitungsmaßnahmen auf die Punkanzahl des Pasinger-Klostergarten-Datensatzes. . . . .	64
5.3	Ergebnis des CSF für die unterschiedlichen Testgebiete. . . . .	65
5.4	Ausschnitt aus dem Ergebnis der extrahierten Baumparameter in der Arcisstraße Süd. . . . .	73
B.1	Spezifikationen des verwendeten Laptops. . . . .	107
E.1	Messergebnisse der manuellen Vermessung der Bäume in der Arcisstraße 2023. . . . .	113
E.2	Messergebnisse der manuellen Vermessung der Bäume in der Arcisstraße 2021. . . . .	115
G.1	Extrahierte Baumparameter in der Arcisstraße Nord. . . . .	123
G.2	Extrahierte Baumparameter im Pasinger Klostergarten . . . . .	124
G.3	Extrahierte Baumparameter in der Arcisstraße Süd. . . . .	127



---

# Abkürzungsverzeichnis

---

<b>ADE</b>	Application Domain Extension
<b>AdV</b>	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
<b>ALKIS</b>	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
<b>ALS</b>	Airborne Laser Scanning
<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>BHD</b>	Brusthöhendurchmesser
<b>CAD</b>	Computer-Aided Design
<b>CC BY-NC-SA 4.0</b>	Creative Commons Attribution-Non Commercial-Share Alike 4.0
<b>CityGML</b>	City Geography Markup Language
<b>CSF</b>	Cloth Simulation Filter
<b>csv</b>	Comma Separated Values
<b>DBH</b>	Diameter at Breast Height
<b>DGM</b>	Digitales Geländemodell
<b>DOM</b>	Digitales Oberflächenmodell
<b>FME</b>	Feature Manipulation Engine
<b>Fraunhofer IOSB</b>	Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung
<b>GB</b>	Gigabyte
<b>GIS</b>	Geoinformationssystem

<b>GML</b>	Geography Markup Language
<b>GUI</b>	Graphical User Interface
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit
<b>INS</b>	Inertial Navigation System
<b>ISO</b>	Internationale Organisation für Normung
<b>JSON</b>	JavaScript Object Notation
<b>KIT</b>	Karlsruher Institut für Technologie
<b>las</b>	Laser
<b>LoD</b>	Level of Detail
<b>MB</b>	Megabyte
<b>MLS</b>	Mobile Laser Scanning
<b>MODISSA</b>	Mobile Distributed Situation Awareness
<b>NaN</b>	Not a Number
<b>OGC</b>	Open Geospatial Consortium
<b>OpenMP</b>	Open Multi-Processing
<b>PLS</b>	Personal Laser Scanning
<b>pcd</b>	Point Cloud Data
<b>RANSAC</b>	Random Sample Consensus
<b>ROS</b>	Robotic Operating System
<b>RTK</b>	Real-Time-Kinematik
<b>SAPOS</b>	Satellitenpositionierungsdienst
<b>SLAM</b>	Simultaneous Localization and Mapping
<b>SOR</b>	Statistical Outlier Removal
<b>TLS</b>	Terrestrial Laser Scanning

<b>TUM</b>	Technische Universität München
<b>TUM-PF</b>	Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>ULS</b>	Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-borne Laser Scanning
<b>UML</b>	Unified Modeling Language
<b>UUID</b>	Universally Unique Identifier
<b>XML</b>	Extensible Markup Language



---

# Danksagung

---

Zuallererst möchte ich meinem Betreuer Philipp-Roman Hirt danken, der mich von der Themenfindung bis zur Fertigstellung der Masterarbeit immer kompetent, mit viel Zeit und konstruktivem Feedback unterstützt hat. Auch bei meinem außerplanmäßigen Kreuzbandriss und den damit einhergegangenen Einschränkungen und Krankschreibungen konnte ich auf seinen Rückhalt zählen.

Außerdem möchte ich meinen Korrekturleserinnen und Korrekturlesern für ihre Unterstützung, Expertise und Zeit danken. Sie haben meiner Masterarbeit den letzten Schliff verliehen und unter anderem meine Kommasetzung geduldig verbessert. Zudem danke an Nico für die Unterstützung vor allem bei technischen Fragen, an Felix für den hilfreichen Austausch über CityGML, an Rosi für ihre FME-Expertise und an Alex für die Unterstützung bei der Vorbereitung der Vermessung der Bäume auf der Pinakothekswiese.

Weiterhin danke an Mona Goebel von der Technischen Universität Braunschweig für die Messkampagne im Pasinger Klostergarten mit eigenem Rucksacksystem, die Bereitstellung der Daten und den hilfreichen Mailaustausch.

Danke an Tatjana Kutzner und Christof Beil vom Geoinformatik Lehrstuhl der TUM für die Unterstützung bei CityGML.

Danke an Andreas Geiger vom KIT für die Veröffentlichung des Tree3D-Codes auf Github.

Danke an alle „coolen Geodäten“, Kommilitoninnen und Kommilitonen und Leute im E-Labor. Wir haben das Studium gemeinsam gemeistert, immer zusammengehalten und dabei meistens auch noch Spaß gehabt.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für ihre bedingungslose Unterstützung und ermutigenden Worte in allen Phasen dieser Masterarbeit und darüber hinaus im gesamten Studium bedanken.



---

# 1 Motivation und Problemstellung

---

Bei der Gestaltung einer lebenswerten Stadt spielen Bäume eine wichtige Rolle und werten das Stadtbild entscheidend auf, wenn sie zum Beispiel als Straßensäumung eingesetzt werden. Auch in einem urbanen Park dürfen Bäume nicht fehlen und stellen dort oft die wichtigsten und markantesten Elemente dar. Sie haben dabei nicht nur eine gestalterische Funktion inne, sondern tragen im Kontext der voranschreitenden Klimaerwärmung entscheidend zur Senkung der innerstädtischen Temperatur, zur Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit und des Sauerstoffgehaltes bei [Rötzer et al., 2021; Armson et al., 2012; Moser et al., 2017]. Darüber hinaus bieten Bäume einen gewissen Lärmschutz, binden Staubpartikel aus der Luft und bieten gerade in Städten einen wichtigen Lebensraum für zahlreiche Tierarten [Rötzer et al., 2021; Semmler & Wochatz, 1994]. Somit steigern Bäume im urbanen Raum entscheidend die Lebensqualität und tragen zur Verbesserung des Stadtklimas bei.

Zur Wahrung der Sicherheit von Verkehrsteilnehmern sind die Aufnahme und Kartierung von Bäumen im städtischen Raum und ihre regelmäßigen Kontrollen zwingend erforderlich. Dies geschieht normalerweise durch die relativ aufwändige und manuelle Aufnahme beziehungsweise Kontrolle der Bäume, mit dem Ziel aus diesen Daten ein Baumkataster abzuleiten. In ihm ist jeder Baum mit seinen Lagekoordinaten sowie weiteren Attributen wie Baumart, Brusthöhendurchmesser (BHD) (englisch: Diameter at Breast Height (DBH)), Gesundheitszustand und/oder Baumhöhe verzeichnet. Ein Baumkataster an sich ist dabei nicht gesetzlich vorgeschrieben, allerdings hat der Baumeigentümer bei etwaigen entstandenen Schäden durch seine Bäume die Beweispflicht [Baumgarten et al., 2004].

Neben der Nutzung eines Baumkatasters zu Dokumentationszwecken gibt es noch andere mögliche Einsatzgebiete: Die darin enthaltenen Daten der Bäume können zur realitätsnahen Visualisierung der Bäume in dreidimensionalen Stadtmodellen und zu Modellierungs-, Planungs- und

Simulationszwecken von neu geplanten oder bestehenden Straßen, Plätzen oder Parks genutzt werden. So können zum Beispiel Abschattungs- oder Solarpotentialanalysen unter Einbeziehung des Baumbestandes durchgeführt werden [Hurst & Geiger, 2020]. Hierzu müssen die Daten allerdings in digitaler Form vorliegen und es ist ein dreidimensionales realitätsnahes Modell der Bäume erforderlich. Letzteres wird von den meisten digitalen Baumkatastern heutzutage noch nicht unterstützt [Hurst & Geiger, 2020].

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Baumbeständen und deren Erfassung in unterschiedlichen urbanen Umgebungen in München. Bisher ist der Kenntnisstand der Stadt München hinsichtlich des aktuellen Baumbestandes limitiert, da lediglich Daten darüber vorliegen, wie viele Bäume jährlich gefällt werden [PR Hirt, Persönliche Kommunikation, 01. Februar 2023]. Um dies zu ändern, will die Stadt München ein aktuell laufendes Projekt nutzen, bei welchem mit einem Mobile-Mapping-System der Straßenraum im Stadtgebiet erfasst werden soll [Landeshauptstadt München, 2023]. Primäres Ziel ist hierbei die Aufnahme der Straßeninfrastruktur mit unter anderem Verkehrsschildern, Fahrbahnmarkierungen und Parkmöglichkeiten aber auch eine Inventarisierung aller Baumstandorte mit weiterführenden Baummetriken. Hierzu zählen zum Beispiel der Stammdurchmesser, die Baumhöhe und der Kronendurchmesser. Dieses Projekt stellt ein Paradebeispiel für einen aktuellen Anwendungsfall dar, bei dem die hier entwickelte Methodik eingesetzt werden kann, um aus den Punktwolken ein Baumkataster für München zu erstellen.

Im Folgenden soll untersucht werden, inwiefern und wie weit der Prozess der Aufnahme und Kartierung der Bäume automatisiert werden kann. Datengrundlage hierzu sollen Punktwolken sein, die mittels unterschiedlicher Systeme wie Mobile Laser Scanning (MLS) oder Terrestrial Laser Scanning (TLS) aufgenommen wurden, da die Automatisierung möglichst systemunabhängig funktionieren soll. Darüber hinaus soll eine Schnittstelle zwischen dem zweidimensionalen Baumkataster und einem dreidimensionalen Stadtmodell oder Digitalen Zwilling geschaffen werden, um unter anderem realitätsnahe Simulationen mit Bäumen, wie zum Beispiel Abschattungsanalysen oder Sichtbarkeitsanalysen, ermöglichen zu können. Nachfolgend werden die Forschungsfragen sowie die Zielsetzung der Masterarbeit definiert.

## 1.1 Forschungsfragen

Der hier vorgestellten Masterarbeit wird folgende übergreifende Forschungsfrage vorangestellt:

Inwiefern und wie weit lässt sich die Generierung eines Baumkatasters automatisieren und für Simulationen in 3D-Stadtmodellen unter Verwendung von Punktwolken aus unterschiedlichen urbanen Umgebungen nutzbar machen?

Daraus ableiten lassen sich die im Folgenden dargelegten Forschungsfragen und Zielsetzungen, welche durch diese Masterarbeit beantwortet beziehungsweise erreicht werden sollen. Als Forschungsgrundlage soll ein Programm zur automatisierten Generierung eines Baumkatasters aus Punktwolken in Python konzipiert, entwickelt und implementiert werden. Mit diesem Programm sollen zwei Datensätze aus einem urbanen Park und von einem Straßenzug vergleichend betrachtet werden. Das Konzept, die Struktur und die Umsetzung des Ablaufes werden in den folgenden Kapiteln ebenfalls behandelt.

1. (Recherche) Welche Möglichkeiten existieren derzeit, um aus Punktwolken Bauminformationen zu extrahieren? Welche Aufnahmemethoden für Punktwolken eignen sich am besten im Kontext dieses speziellen Anwendungsfalls? Welche Anforderungen bestehen grundsätzlich an ein Baumkataster im urbanen Raum im Hinblick auf Attribute und Genauigkeiten?
2. (Recherche / Theorie) Welche konzeptionellen Schritte sind nötig, um automatisiert von einer Punktwolke über die Extrahierung der Baumparameter zu einer dreidimensionalen Darstellung im Zusammenhang mit einem 3D-Stadtmodell zu gelangen? Wo liegen Schwierigkeiten und Limitationen und wie lassen sich diese überwinden?
3. (Umsetzung) Welche Attribute auf relevantem Signifikanz- und Genauigkeitsniveau, Genauigkeiten und Resultate lassen sich mit dem automatisierten Generierungsworkflow aus der Punktwolke in den Beispielgebieten extrahieren? Welche Schwierigkeiten ergeben sich?
4. (Synthese) Welche Einschränkungen ergeben sich für den Algorithmus? Gibt es Gebiete, für die die Automatisierung besser funktioniert als für andere? Können aus jedem erkannten Baum die benötigten Attribute auf einem relevanten Signifikanz- und Genauigkeitsniveau abgeleitet werden?
5. (Synthese) Sind die angewendeten Methoden ausreichend, um ein automatisiertes Baumkataster zu generieren? Wie verhält sich das damit generierte Kataster unter dem Gesichts-

punkt verschiedener Indikatoren (z. B. Zeit, Kosten, Arbeitsaufwand, Genauigkeit) im Vergleich zu einem herkömmlichen Kataster?

## 1.2 Zielsetzung

Als Ergebnis der Masterarbeit soll eine umfassende, automatisierte Methodik zur Erstellung eines Baumkatasters als modulares Programm vorliegen. Der modulare Aufbau soll dabei einen späteren Austausch von einzelnen Programmteilen, welche einzelnen Methoden entsprechen, ermöglichen. Darüber hinaus soll eine Schnittstelle zwischen Baumkataster und semantischem 3D Stadtmodell geschaffen werden, um die Grundlage im Bereich der Vegetation für einen Digitalen Zwilling bereitzustellen. Dies ermöglicht realitätsnahe Visualisierungen und Simulationen unter Einbeziehung der Bäume im Stadtgebiet. Eine weitere Ergebniserwartung ist die Einschätzung, inwieweit die Generierung eines Baumkatasters automatisiert werden kann und in welchen Fällen Bäume weiterhin manuell aufgenommen werden müssen. Dabei gilt es zu bewerten, ab wann sich eine Automatisierung lohnt und wann sie die gewünschten Anforderungen nicht mehr erfüllen kann.

---

## 2 Theoretischer Hintergrund

---

Zunächst wird der aktuelle Forschungsstand im Hinblick auf die Datenaufnahme, Einzelbaumsegmentierung, automatische Generierung eines Baumkatasters und die Extraktion von Baumparametern aus Punktwolken aufgezeigt und zusammengefasst. Zudem ist Hintergrundwissen über Baumkataster und Baumparameter unerlässlich, welches in den Abschnitten 2.2 und 2.3 näher erläutert wird. Des Weiteren werden in den Abschnitten 2.4 und 2.5 der Cloth Simulation Filter (CSF) und die Hough-Transformation vorgestellt, welche beide eine zentrale Rolle für die entwickelte Methodik in Kapitel 3 einnehmen. Zuletzt wird in Abschnitt 2.6 auf das Datenformat City Geography Markup Language (CityGML) eingegangen, da dieses das Output-Format des generierten Baumkatasters darstellt.

### 2.1 Aktueller Forschungsstand

In den letzten Jahren wurden in den relevanten Themenbereichen Datenaufnahme, Einzelbaumsegmentierung, automatische Generierung eines Baumkatasters und Extraktion von Baumparametern aus Punktwolken mehrere unterschiedliche wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht. Besondere Bedeutung zeigt hierbei der Bereich Baumsegmentierung aus Punktwolken im Zusammenhang mit der Ermittlung von Baumparametern in der aktuellen Forschung. Auch mit der automatisierten Generierung eines Baumkatasters aus Punktwolken haben sich diverse Forschende beschäftigt. Allerdings wurde nach jetzigem Recherchestand noch nie aus Punktwolkendaten automatisiert ein Baumkataster im CityGML-Format für unterschiedliche urbane Umgebungen erstellt. Die meisten Forschenden haben sich eher auf das Thema Waldinventur in Waldgebieten konzentriert als auf das Thema Baumkataster im urbanen Raum, wobei die Anforderungen differieren. Im Folgenden wird der aktuelle Forschungsstand anhand von ausgewählten Publikationen vorgestellt und der Bezug zur angewendeten Methodik dargelegt.

Um Baumparameter aus einer Punktwolke gewinnen zu können, müssen zunächst die Punktwolken aufgenommen werden. Durch Laserscanning mit verschiedenen Erfassungsplattformen ist es möglich, 3D-Punktwolken mit unterschiedlicher Auflösung und aus verschiedenen Perspektiven

aufzunehmen [Weiser et al., 2022]. Die bekanntesten Methoden sind MLS, TLS, Personal Laser Scanning (PLS) oder Airborne Laser Scanning (ALS). Auch Drohnen eignen sich zur Aufnahme von Punktwolken. Insbesondere die Datenaufnahme durch MLS dient in vielen Publikationen in den Bereichen 3D-Stadtmodelle und Baumkataster als Grundlage zur Datenerfassung beziehungsweise -aktualisierung [Hirt et al., 2021a; Pérez-Martín et al., 2021; Beil et al., 2021; Wysocki et al., 2021]. Für Waldinventuren dagegen ist TLS [Yrttimaa et al., 2020; Broly et al., 2021] oder PLS [Safaie et al., 2021; Tockner et al., 2022; Gollob et al., 2020] weiter verbreitet, da Waldgebiete oft nicht durch Fahrzeuge befahrbar sind. Zur Segmentierung von Baumkronen bietet sich zudem ALS an [Hui et al., 2022], da so große Gebiete schnell erfasst werden können. Im Vergleich zu anderen Aufnahmemethoden könnte es bei der Gewinnung von Baumparametern, wie zum Beispiel dem Stammdurchmesser, zu Genauigkeitseinbußen kommen, da Bereiche unter den Baumkronen nicht ausreichend gut erfasst werden können. Im starken Kontrast dazu steht die manuelle Datenaufnahme zur Ermittlung von Baumparametern, welche in Kapitel 2.2 näher behandelt wird.

Alle vorgestellten Laserscanning-Methoden eignen sich grundsätzlich zur Ermittlung von Baumparametern. Dabei hat jede ihre eigenen Vor- und Nachteile im Hinblick auf Auflösung, Perspektive, Kosten und Praktikabilität. In [Weiser et al., 2022] werden ALS, TLS und UAV-borne Laser Scanning (ULS) kombiniert, um eine umfassende Datenbank von Baumpunktwolken und Baummetriken zu erstellen und die jeweiligen Vorteile der Erfassungsmethoden auszunutzen. Die Baummetriken wurden dabei zum einen aus den Punktwolken abgeleitet und zum anderen direkt im Feld gemessen [Weiser et al., 2022]. Ähnlich dazu kommen für diese Arbeit auch 3D-Punktwolken aus verschiedenen Erfassungssystemen zum Einsatz, um die Unabhängigkeit des entwickelten Programmes von der Datenaufnahme zu zeigen. Darüber hinaus liegen für ein Testgebiet manuelle Messungen als Referenzdaten vor. Die verwendeten Datensätze und die jeweilige Datenaufnahme werden in Kapitel 4 näher beleuchtet.

Nach der Datenaufnahme stehen die rohen 3D-Punktwolken zur Verfügung. Eine Punktwolke ist dabei eine unorganisierte Menge  $P$  von Punkten  $P_1, \dots, P_n$  im dreidimensionalen kartesischen Raum. Jeder Punkt  $P_i$  der Punktwolke hat die drei Koordinaten  $x_i, y_i$  und  $z_i$  und kann zusätzliche Attribute wie Intensität, Farbwerte oder Normalenvektorkomponenten besitzen [Otepka et al., 2013]. Die rohen Punktwolken müssen dann geeignet vorverarbeitet werden, um bestmögliche Ergebnisse in kurzer Zeit zu erhalten. Hierzu zählt die Filterung nach Not a Number (NaN)-Werten und extremen Intensitätswerten, aber auch die Separierung von Bodenpunkten. Als Lösung bietet sich der CSF an [Tockner et al., 2022; Gollob et al., 2020; Pérez-Martín et al., 2021], da er einfach

anzuwenden und in mehreren Programmiersprachen und Programmen zur Verfügung steht (vgl. Kapitel 2.4). Dieses Verfahren wird auch in der vorliegenden Masterarbeit angewendet. Bei der Arbeit mit Vegetation in Punktwolken gilt es allgemein zu beachten, dass Vegetation leicht als Rauschen fehlinterpretiert wird [Goebel et al., 2023]. Um zu vermeiden, dass wichtige Informationen verloren geht, werden nur extreme Ausreißer gefiltert und die Vorverarbeitung so gering wie möglich gehalten.

Ein noch nicht hinreichend gelöstes Problem auf dem Weg zur Extrahierung von Baumparametern ist die Segmentierung von Einzelbäumen aus Punktwolken. Hierzu gibt es aus den letzten Jahren viele neue Veröffentlichungen, insbesondere auch im Zusammenhang mit der Ermittlung von Baumparametern. Die Segmentierung von Objekten aus Punktwolken ist nach Nguyen & Le [2013] der Prozess, eine Punktwolke in mehrere homogene Regionen einzuteilen, wobei die Punkte einer Region dieselben Eigenschaften besitzen. Im Bereich Baumsegmentierung werden verschiedene Ansätze verfolgt, welche in punktbasierte und voxelbasierte Methoden unterteilt werden können [Hirt et al., 2021a]. Beispiele für eine voxelorientierte Herangehensweise zeigen Brolly et al. [2021] und Gollob et al. [2020], während Hui et al. [2022] ein Hybridmodell aus rasterbasierter und punktbasierter Baumsegmentierung anwendet. Neuere Ansätze verwenden Künstliche Intelligenz und Deep Learning zur Baumsegmentierung, wozu zum Beispiel [Safaie et al., 2021] zählt. Diese Masterarbeit soll allerdings keine Künstliche Intelligenz sondern klassische Methoden verwenden. Bis jetzt hat sich noch keine Herangehensweise vollumfänglich etabliert, wobei unter den klassischen Methoden der voxelbasierte Ansatz klare Vorteile hat [Hirt et al., 2021a]. Diese Vorteile ergeben sich vor allem durch die Strukturiertheit gegenüber einer unorganisierten Punktwolke. Ein Nachteil liegt in der Inhomogenität von vor allem MLS-Punktwolken. Mit zunehmender Entfernung vom Sensor nimmt die Punktdichte ab, wodurch gegebenenfalls für ein Voxel keine dimensionalitätsbezogenen Merkmale mehr berechnet werden können und theoretisch noch identifizierbare Objekte dadurch verloren gehen. Da die exakte Segmentierung von Bäumen noch eine größere Schwierigkeit darstellt, gibt es auch viele Forschende, die die Einzelbäume manuell oder semi-automatisch aus Punktwolken segmentieren. Beispiele hierfür sind Weiser et al. [2022] und Pérez-Martín et al. [2021]. Diese Herangehensweise ist für das Ziel dieser Masterarbeit, eine vollautomatische Methodik zu entwickeln, allerdings nicht geeignet.

Für die Entwicklung des vollautomatischen Workflows zur Extrahierung von Baumparametern wurde auf die schon bestehende Bachelorarbeit von Tobias Zintl (vgl. [Zintl, 2021]) zurückgegriffen. Dieser hat ein Matlab-Programm zur Lokalisierung und Visualisierung urbaner Bäume aus MLS-Punktwolken implementiert. Dabei wurden auch Baumparameter wie BHD, Höhe und



Abbildung 2.1: Ergebnisse der Extraktion von Baumparametern aus einem 2D-Rasterbild mittels Bildverarbeitung [Zintl, 2021].

Kronendurchmesser ermittelt. Als Vorbild diente die Herangehensweise von Simonse et al. [2003]; Aschoff et al. [2004] und Bienert et al. [2007]. Das Prinzip besteht darin unterschiedlich dicke Schichten aus der Punktwolke parallel zum Boden herauszunehmen und in 2D-Rasterbilder zu projizieren. Die Grauwerte kodieren dabei die Höheninformation, sodass diese nicht verloren geht. Mit Hilfe von gängigen Bildverarbeitungsfunktionen und einer zirkulären Hough-Transformation (vgl. Kapitel 2.5) werden dann die Stämme der Bäume als Kreise detektiert. Somit lässt sich der BHD und die Lage der Bäume ermitteln. Die Baumkronendurchmesser wurden aus einem weiteren Grauwertbild, das die Aufsicht auf die Punktwolke darstellt, durch Region-Growing bestimmt. Einen Teil der Ergebnisse aus der Bachelorarbeit veranschaulicht Abbildung 2.1, in welcher auch das 2D-Rasterbild im Hintergrund zu sehen ist. Für diese Arbeit wurde das Matlab-Programm aus [Zintl, 2021] in ein Python-Programm übersetzt und dabei nach den Vorstellungen der Autorin angepasst und verbessert. Das entwickelte Programm soll unabhängig von Lizenzen verwendbar sein, weshalb eine Matlab-Implementierung nicht geeignet ist.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen auch Weiser et al. [2022] in ihrer Publikation. Im Unterschied zu Zintl [2021] werden die Kreise im 2D-Bild mit Random Sample Consensus (RANSAC) beziehungsweise einer Ellipsenanpassung nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate detektiert. Außerdem wurde ein Digitales Geländemodell (DGM) aus ALS-Punktwolken zur Behandlung des Bodens und Festlegung des Null-Höhenlevels verwendet, während bei der Bachelorarbeit lediglich ein fester Höhenwert den Boden und das Höhennulllevel markiert. In der Masterarbeit-Implementierung wurde ein eigenes Verfahren zur Bestimmung der Höhenreferenzfläche entwickelt, welches in Kapitel 3.2 näher beleuchtet wird.

Zur automatischen Erstellung eines Baumkatasters hat das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 2018 ein Konzept zur Generierung eines 3D-Baumkatasters als CityGML-Modell publiziert [Kunz & Geiger, 2018]. Als Ausgangsbasis diente das schon bestehende Baumkataster des KIT-Campus Nord in Form von 2D-Computer-Aided Design (CAD)-Daten, die durch Punktwolken und ein DGM vervollständigt wurden. Der Transformationsprozess dieser Daten in ein 3D-Baumkataster im CityGML-Format basierte auf einer entwickelten Feature Manipulation Engine (FME) Workbench. Bei einer nachfolgenden Veröffentlichung von Hurst & Geiger [2020] sollte das schon bestehende Baumkataster des KIT Campus Nord als Comma Separated Values (csv)-Datei aus der digitalen Baumkatastersoftware Arbokat exportiert werden und mittels eines Python-Programms ins CityGML-Format umgewandelt werden. Hierzu wurden die Bäume als Objekte der Klasse SolitaryVegetationObject des Vegetations-Moduls von CityGML modelliert. Als Attribute besitzen die Baumobjekte neben der genauen Position des Baumes im Gauß-Krüger-System folgende typische Baumkatasterparameter: Lateinischer Name der Baumart, Stammumfang, Baumhöhe und Baumkronendurchmesser.

Für die Master-Thesis ist hier vor allem die Verwendung des Vegetations-Moduls von CityGML im Kontext eines Baumkatasters interessant, sowie die Python-Implementierung der zweiten Veröffentlichung. Diese wurde von den Autoren auf Anfrage für diese Masterarbeit öffentlich zugänglich auf GitHub bereitgestellt [Geiger & Hurst, 2022]. Im Gegensatz zu den beiden oben vorgestellten Vorgehen sollen die Baumparameter dabei aus Punktwolken gewonnen werden und nicht einem schon bestehenden digitalen Baumkataster entnommen werden.

## 2.2 Baumkataster

Ein Baumkataster wird von Kommunen und Stadtverwaltungen zur Speicherung und Verwaltung des Baumbestandes eingesetzt [GALK, 2005; Stadt Augsburg, 2021]. Den Inhalt stellen im Allge-



Abbildung 2.2: Ausschnitt aus dem öffentlich zugänglichen Baumkataster der Stadt Frankfurt am Main [Grünflächenamt Frankfurt am Main, 2022].

meinen Stammdaten zum Baum wie Art, Pflanzjahr oder Standort dar. Darüber hinaus wird zum Beispiel die Vitalitäts- beziehungsweise Schadstufe von jedem Baum festgehalten [GALK, 2005]. Es liefert somit die Grundlagendaten für die gesetzlich vorgeschriebenen Baumkontrollen und dient im Sinne der Nachweispflicht als Dokumentationsrahmen [GALK, 2005; Baumgarten et al., 2004; Stadt Augsburg, 2021]. Dementsprechend können mit einem Baumkataster zuverlässige Aussagen zu Anzahl und Standorten der Bäume, sowie ihrem Vitalitätszustand und ihrer Verkehrssicherheit getroffen werden [GALK, 2005; Baumgarten et al., 2004]. Während früher überwiegend analoge Baumkataster in Form von Karteikarten in Verbindung mit Kartenplänen zum Einsatz kamen, werden heutzutage überwiegend digitale Baumkataster geführt. Hierbei werden die Baumdaten in Datenbanksystemen erfasst und verwaltet. Für den Umgang mit räumlichen Daten bietet sich ein Geoinformationssystem (GIS) an [GALK, 2005]. Der Umfang des eingesetzten Baumkatasters hängt von den organisatorischen, finanziellen und datentechnischen Rahmenbedingungen der Kommunen ab [GALK, 2005]. Dadurch existieren viele verschiedene Baumkatasterlösungen, welche sich grundlegend voneinander unterscheiden. Die Unterschiede zeigen sich unter anderem in der verwendeten Software, der Darstellung, dem Umfang und welche Art von Daten im Kataster verzeichnet sind. Die Abbildungen 2.2, 2.3 und 2.4 zeigen vergleichend drei Baumkataster aus den Städten Hamburg, Frankfurt am Main und Graz, welche diese Unterschiede verdeutlichen. Dabei ist anzumerken, dass nicht alle Baumkatasterdaten auch öffentlich zugänglich sind und dargestellt werden. Das Grünflächenamt Frankfurt am Main stellt zusätzlich zur abgebildeten Webanwendung (Abbildung 2.2) Baumkatasterdaten zum Download auf ihrer Webseite zur Ver-



Abbildung 2.3: Ausschnitt aus dem öffentlich zugänglichen Baumkataster der Stadt Hamburg [LGV Hamburg, 2023].

fügung [Grünflächenamt Frankfurt am Main, 2022]. Ein Ausschnitt aus dem Datensatz von 2022 befindet sich im Anhang C.

### 2.2.1 Anwendungsaufgaben

Der Haupteinsatzort von Baumkatastern liegt in der Baumkontrolle und -pflege, sowie in statistischen Auswertungen [GALK, 2005]. Im Vordergrund steht dabei immer die Gewährleistung der gesetzlich vorgeschriebenen Verkehrssicherheit der Bäume [GALK, 2005; Baumgarten et al., 2004; Stadt Augsburg, 2021].

Eine Baumkontrolle ist „die fachlich qualifizierte Inaugenscheinnahme zur Verkehrssicherheit vom Boden aus ohne Werkzeuge oder andere Hilfsmittel“ [Baumgarten et al., 2004] und gesetzlich vorgeschrieben [GALK, 2005; Baumgarten et al., 2004]. Das Kontrollintervall ist abhängig vom Alter, der Sicherheitserwartung, des Standortes und der Beschaffenheit des Baumes, sowie von der Art und Häufigkeit des zu erwartenden Verkehrs [Baumgarten et al., 2004]. Somit müssen zum Beispiel jüngere Bäume nicht so häufig kontrolliert werden wie ältere Bäume, bei welchen jährliche oder sogar halbjährliche Kontrollen angebracht sein können [Baumgarten et al., 2004]. Die Baumkon-



Abbildung 2.4: Ausschnitt aus dem öffentlich zugänglichen Baumkataster der Stadt Graz in Österreich [Stadtvermessung-Graz, 2023].

trollen an sich werden je nach Stadt oder Gemeinde unterschiedlich durchgeführt, wobei jedoch überall die Gewährleistung der Verkehrssicherheit (vgl. Kapitel 2.2.3) der Bäume im Vordergrund steht [Baumgarten et al., 2004; Stadt Augsburg, 2021]. In der Regel haben Baumkontrolleur\*innen nur wenige Minuten pro Baum zur Verfügung, um die Verkehrssicherheit festzustellen. Im Unterschied dazu steht die fachmännische Baumuntersuchung unter dem Einsatz von Werkzeugen, speziellen Verfahren und Geräten. Diese kommt bei Auffälligkeiten und Schäden einzelner Bäume gezielt zum Einsatz, die während der Baumkontrollen festgestellt wurden. [Baumgarten et al., 2004]

Die statistische Auswertung wird zum Beispiel hinsichtlich der Ermittlung von Informationen über den Baumbestand, den Zustand und der Standorte der städtischen Bäume eingesetzt. Die Ergebnisse dienen im Weiteren als Grundlage für Planungen und Entscheidungen im Bereich der Stadtbegrünung. Außerdem stellen sie die Basis für Umweltberichte oder andere Veröffentlichungen dar [GALK, 2005; Stadt Augsburg, 2021].

### 2.2.2 Kosten

Die Kosten eines Baumkatasters lassen sich aufgrund des heterogenen Marktes in Bezug auf Dienstleistungen und Produkte nur schwer abschätzen [GALK, 2005]. Darüber hinaus werden je nach Stadt und Kommune unterschiedliche Anforderungen und Anwendungsaufgaben an das Baumkataster gestellt, welche den Umfang und damit die Kosten des individuellen Baumkatasters bedingen [GALK, 2005]. Die allgemeinen Kosten eines Baumkatasters entstehen unter anderem durch Personal, Datenaufnahme und -fortführung, Software, Hardware und Schulungen [GALK, 2005]. Ein weiterer Kostenfaktor ist der Genauigkeitsanspruch an die raumbezogenen Daten, welcher einen direkten Einfluss auf die Erfassungskosten hat [GALK, 2005]. Daher sollte je nach Anwendungsaufgaben des Baumkatasters der Anspruch an die Genauigkeit genau abgewogen werden. Im Umkehrschluss kann ein Baumkataster anschließend auch als Grundlage für verlässliche Aussagen zum Finanzmittelbedarf bei der Pflege, Aufnahme und Kontrolle des Baumbestandes dienen und dabei helfen, die Organisation und damit die Kosten dieser Aufgaben zu optimieren [Baumgarten et al., 2004].

### 2.2.3 Rechtliche Grundlagen

Allgemein gibt es gesetzliche Bestimmungen zum Schutz, der Pflege und der Entwicklung der städtischen Bäume, welche in den Naturschutzgesetzen auf Landes- und Bundesebene festgeschrieben sind. Jedes Bundesland hat dabei eigene landesrechtliche Baumschutzregelungen, welche als Übersicht in [Semmler & Wochatz, 1994] aufgezeigt werden. Auf kommunaler Ebene haben viele Städte und Gemeinden darüber hinaus rechtsverbindliche Grünordnungs- und Landschaftspläne. Hierbei stehen auf der einen Seite die rechtlichen Bestimmungen zum Erhalt des Stadtbild prägenden Baumbestands im Fokus, auf der anderen Seite sind Kommunen dazu angehalten, die Verkehrssicherheit ihrer Bäume sicherzustellen. Dies bedeutet für die Kommunen einen oft hohen finanziellen und personellen Aufwand. [Semmler & Wochatz, 1994]

Im Speziellen ist jeder Baumeigentümer gesetzlich dazu verpflichtet, die Verkehrssicherheit seiner Bäume zu gewährleisten [Baumgarten et al., 2004; Semmler & Wochatz, 1994; Stadt Augsburg, 2021]. „Unter Verkehrssicherheit versteht man den Zustand eines Baumes (insbesondere Stand- und Bruchsicherheit), in dem er weder in seiner Gesamtheit noch in seinen Teilen eine vorhersehbare Gefahr darstellt“ [Baumgarten et al., 2004]. Somit bezeichnet die Verkehrssicherheit das Gefahrenpotential eines Baumes für den Verkehr. Gesetzlich leitet sich der Begriff „Verkehrssicherungspflicht“ aus Rechtsprechungen nach der allgemeinen Haftungsregelung nach §823 Abs. 1 BGB Schadensersatzpflicht ab, besitzt aber ansonsten keine eigene gesetzliche Bestimmung

[Baumgarten et al., 2004]. Verkehrssicherungspflichtig ist der Eigentümer des Baumes, was sowohl auf Kommunen aber auch Privatpersonen zutreffen kann [Baumgarten et al., 2004]. Ein Baum ist rechtlich gesehen eine fest mit dem Grundstück verbundene Sache, wodurch der Grundstückseigentümer gleichzeitig auch Eigentümer aller auf dem Grundstück wachsenden Bäume ist [Baumgarten et al., 2004]. Der Verkehrssicherungspflicht unterliegen dabei öffentlich zugängliche Wege, Straßen und Einrichtungen wie Parks oder Spielplätze. Nach einem Urteil des Bundesgerichtshofs vom 21. Januar 1965 ist eine visuelle Kontrolle der Bäume ausreichend, sofern keine Verdachtsmomente für eine mangelnde Verkehrssicherheit eines Baumes vorliegen [Baumgarten et al., 2004]. Die Häufigkeit der Baumkontrollen ist gesetzlich nicht geregelt, was in Fachkreisen divers diskutiert wird und für Unsicherheit sorgt [Baumgarten et al., 2004]. Weiterhin haften Baumeigentümer nicht für Schäden, welche auf höhere Gewalt zurückgeführt werden können. Dafür sind ein Nachweis der regelmäßigen Baumkontrollen und die lückenlose Darstellung der Entscheidungsabläufe rechtlich wichtig. Als Dokumentationsrahmen für Städte und Kommunen bietet sich hierfür ein Baumkataster an [GALK, 2005; Baumgarten et al., 2004; Stadt Augsburg, 2021].

## 2.3 Baumparameter

Baumparameter stellen die Basisdaten jeden Baumkatasters dar und sind darüber hinaus wichtige Größen in der Forstwirtschaft, -inventur und -forschung [GALK, 2005; West, 2015]. Welche Baumparameter in einem Baumkataster verzeichnet sind und in welcher Genauigkeit hängt vom Baumkataster und seinen Anwendungsaufgaben ab [GALK, 2005]. In der Forstwirtschaft und -wissenschaft dienen die Messungen zum besseren Verständnis, wie Bäume wachsen und sich entwickeln [West, 2015]. Darüber hinaus lässt sich anhand der gewonnenen Parameter ermitteln, wie viel der vom Menschen gewünschten Produkte im Wald enthalten sind und ob dieser angemessen bewirtschaftet wird [West, 2015]. Im Folgenden wird auf die wichtigsten und gängigsten Baumparameter wie BHD, Baumhöhe und Kronendurchmesser näher eingegangen, sowie die entsprechenden herkömmlichen Messmethoden vorgestellt. „Das Verfahren zur Messung der Höhe und Dicke stehender Bäume“ [Dudenredaktion, oJ] wird in der Fachsprache Dendrometrie genannt.

### 2.3.1 Brusthöhendurchmesser (BHD)

Wichtigster Baumparameter vor allem in der Forstwissenschaft ist der Stammdurchmesser eines Baumes, da er eng mit vielen anderen Größen korreliert. Hierzu zählen die Biomasse, die Holzmenge oder die Wettbewerbsposition eines Baums mit seinem Umfeld [West, 2015]. Weltweit wird der Stammdurchmesser auf Brusthöhe ermittelt, was normalerweise einer Höhe von 1,3 m über

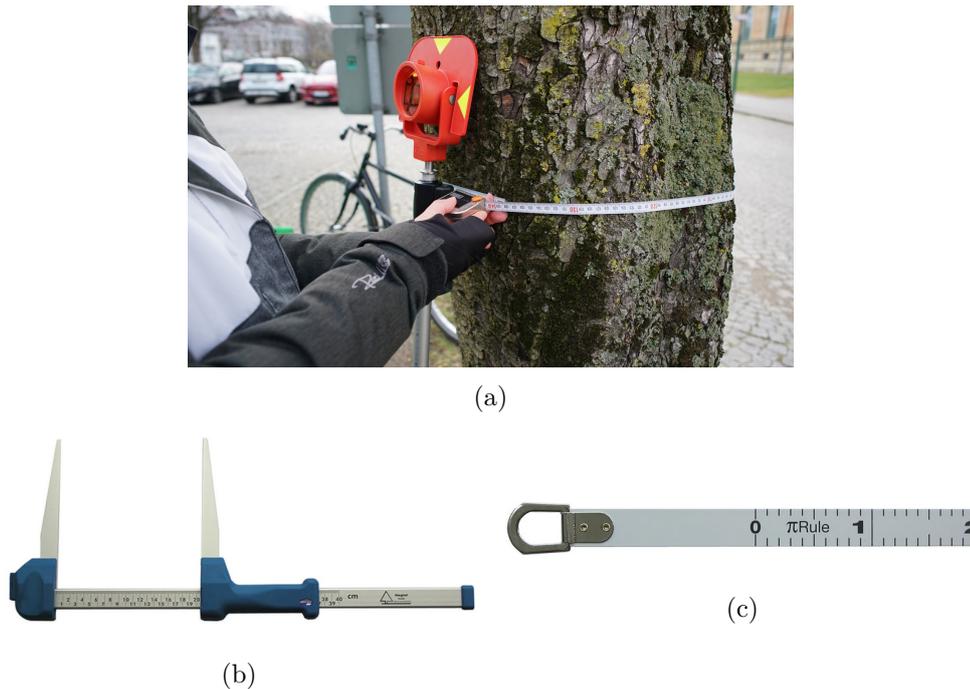


Abbildung 2.5: Bestimmung des Brusthöhendurchmessers. a Exemplarische Messung des Stammdurchmessers auf Brusthöhe (Eigene Aufnahme). b Messschieber [Forestry Tools, 2023]. c Skala des Durchmesserbands für die direkte Ablesung des Baumdurchmessers [Forestry Tools, 2023].

dem Boden beziehungsweise der Basis eines Baums entspricht [West, 2015; Semmler & Wochatz, 1994; Nagel, 2001]. Wächst der Baum auf abschüssigem Gelände, wird sie vom höchsten Punkt des Bodens an der Basis des Baumes aus gemessen [West, 2015; Nagel, 2001]. Die gebräuchlichste Methode zur Messung des Durchmessers eines Stamms ist die Messung seines Umfangs auf 1,3 m mit einem gewöhnlichen Maßband oder einem Durchmesserband (Abbildung 2.5a) [West, 2015; Nagel, 2001]. Das spezielle Durchmesserband besteht aus dehnungsresistentem Stahl oder Glasfaser und ist in Einheiten der mathematischen Konstante  $\pi$  geeicht (Abbildung 2.5c) [West, 2015; Nagel, 2001]. So kann der entsprechende Durchmesser eines Baums ohne Umrechnung direkt abgelesen werden. Für dünnere Bäume wird häufig auch ein Messschieber (Abbildung 2.5b) verwendet, da er schneller in der Verwendung ist als ein Maßband [West, 2015; Nagel, 2001]. Deutlich seltener kommen optische Instrumente, Biltmore-Stäbe oder das Wheeler-Prisma zum Einsatz [West, 2015]. Optische Instrumente haben den Vorteil, dass der Stammdurchmesser auch in hohen Höhen bestimmt werden kann, was zur Volumenbestimmung eines Baumstamms wichtig ist [West, 2015]. Dabei muss beachtet werden, dass ein Baum im Allgemeinen keinen exakt kreisförmigen Stammquerschnitt aufweist, da er ein organisches Lebewesen ist. Das bedeutet, dass der Stammdurchmesser in der Regel fehlerbehaftet ist [Pulkkinen, 2012; West, 2015; Nagel, 2001]. Studien haben ergeben, dass dies zu einer Verzerrung von etwa 2-3% bei der Bestimmung der Stammquerschnittsfläche führen kann [Gregoire et al., 1990; Pulkkinen, 2012]. Während diese

Verzerrung für eine detaillierte Forschung von Belang sein könnte, ist sie für forstwirtschaftliche Zwecke vernachlässigbar [West, 2015; Pulkkinen, 2012]. Auch für Baumkataster spielt diese Verzerrung keine Rolle, da für normale Anwendungen kein so hoher Genauigkeitsanspruch an den BHD vorliegt. Die Genauigkeit des Stammdurchmessers beziehungsweise -umfangs liegt bei den meisten Baumkatastern im Zentimeterbereich [Semmler & Wochatz, 1994; LGV Hamburg, 2023]. Auch die Leistungsbeschreibung des Projekts zur Befahrung von München verlangt eine Genauigkeit des BHDs von 5 cm bei einer einfachen Standardabweichung [Landeshauptstadt München, 2023].

### 2.3.2 Baumhöhe

Die Baumhöhe ist in West [2015] definiert als die vertikale Distanz zwischen dem Bodenniveau und dem höchsten grünen Punkt des Baums. Sie ist wichtig für die Berechnung der Holzmenge, für die Bestimmung der Wettbewerbsposition und für die Bewertung der Produktionskapazität eines Baums im Wald [West, 2015]. Dagegen im urbanen Bereich und im Kontext eines Baumkatasters lassen sich aus der Höhe eines Baums Aussagen über den Schattenwurf und Sichtprofileinschränkungen ableiten. Darüber hinaus ist die Baumhöhe eine wichtige Größe für baumpflegerische Maßnahmen im Kronenbereich [Semmler & Wochatz, 1994].

Zur Messung der Baumhöhe bis 15 m können Messstangen verwendet werden, mit welchen eine Genauigkeit im Dezimeterbereich erreicht werden kann. Weniger aufwendig hingegen sind trigonometrische und geometrische Verfahren oder Messungen mit speziellen Lasermessgeräten (Abbildung 2.6). Mit ihnen lässt sich die Höhe eines Baums auf etwa einen halben Meter genau bestimmen. Ist eine präzisere Höhenbestimmung erforderlich kommen Tachymeter zum Einsatz. [West, 2015]

Für ein Baumkataster im urbanen Raum muss nach Semmler & Wochatz [1994] die Baumhöhe lediglich auf 5 m genau erfasst werden. Im Gegensatz dazu wird im öffentlich zugänglichen Baumkataster der Stadt Frankfurt am Main die Baumhöhe auf 1 m genau angegeben (vgl. Abbildung C.1) [Grünflächenamt Frankfurt am Main, 2022] und auch als Ergebnis der Befahrung von München sollen die Baumhöhen in Abstufungsschritten von 1 m bestimmt werden [Landeshauptstadt München, 2023]. In den Baumkatastern aus Hamburg (vgl. Abbildung 2.3) und Graz (vgl. Abbildung 2.4) hingegen sind keine Höheninformationen enthalten [LGV Hamburg, 2023; Stadtvermessung-Graz, 2023].



Abbildung 2.6: Kompakter Laser-Entfernungsmesser und Höhenmesser [Forestry Tools, 2023].

### 2.3.3 Kronendurchmesser

Der Kronendurchmesser ist die Größe der horizontalen Kronenausdehnung und wird in einem Baumkataster normalerweise im Meterbereich angegeben [Semmler & Wochatz, 1994; Grünflächenamt Frankfurt am Main, 2022; LGV Hamburg, 2023]. Laut der Leistungsbeschreibung zur Befahrung von München beispielsweise soll der Kronendurchmesser in Abstufungsschritten von 2 m angegeben werden [Landeshauptstadt München, 2023]. Zur manuellen Messung kann ein Kronenspiegel verwendet werden, mit welchem durch das Abloten der längsten Äste die horizontale Ausdehnung der Krone bestimmt werden kann [Nagel, 2001]. Der Kronendurchmesser ist vor allem im urbanen Raum und für ökologische Untersuchungen interessant, da er maßgeblich den Schattenwurf eines Baumes und den Lichtraum einer Straße bedingt [Zintl, 2021; Nagel, 2001]. Für die Forstinventur spielt er nur eine untergeordnete Rolle [West, 2015].

## 2.4 Cloth Simulation Filter (CSF)

Der Cloth Simulation Filter wurde von Zhang et al. [2016] entwickelt und dient zur Trennung der Bodenpunkte von den restlichen Punkten einer Punktwolke. Die Bodenpunkte werden zum Beispiel für das Erstellen von DGMs benötigt.

Die Funktionsweise des CSF ist angelehnt an das einfache physikalische Verhalten einer Tischdecke: Wird die Tischdecke über einer Geländeoberfläche ausgebreitet, schmiegt sie sich aufgrund der Schwerkraft an die Oberflächenstruktur an. Die Tischdecke spiegelt das Digitale Oberflächenmodell (DOM) der Geländeoberfläche wider. Da allerdings lediglich die Bodenpunkte gewonnen werden sollen, wird die Punktwolke einfach invertiert, bevor die Tischdecke darübergelegt wird. So wird ein DGM anstatt eines DOMs erstellt. Dieses Prinzip ist in Abbildung 2.7 illustriert und stellt die Basis für den CSF-Algorithmus dar. [Zhang et al., 2016]

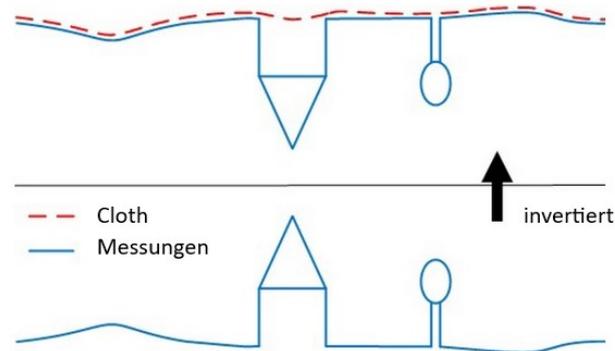


Abbildung 2.7: Überblick über den CSF. Englisch Originalbild aus [Zhang et al., 2016].

Für die Implementierung des Prinzips wird eine modifizierte Version der „cloth simulation“ als Grundlage verwendet. Dies ist eine Methode aus dem Bereich der Computergrafik zur Modellierung von dreidimensional hängendem Stoffmaterial und wurde 1986 von Jerry Weil vorgestellt [Weil, 1986]. Die wichtigsten Schritte der Implementierung des CSF sind in Abbildung 2.8 dargestellt. Zuerst wird ein „Cloth“ über die invertierte Punktwolke gelegt, was den Ausgangszustand des Algorithmus ergibt (a). Danach wird die Verschiebung der einzelnen Punkte unter dem Einfluss der Schwerkraft berechnet (b). Nach diesem Schritt können sich einige Cloth-Punkte unterhalb der Bodenmessungen befinden. Dies wird durch die Schnittpunktprüfung in Schritt (c) wieder behoben: Diejenigen Punkte, die sich unterhalb der gemessenen Bodenpunkte befinden, werden auf das Bodenlevel verschoben und als unbeweglich eingestuft. Im letzten Schritt (d) werden die inneren Kräfte der cloth simulation berücksichtigt. Die noch als beweglich eingestuften Punkte werden entsprechend der von den Nachbarn erzeugten Kräfte bewegt. Zwischen der resultierenden Punktwolke („Cloth“) und der Eingangspunktwolke wird die Cloud-to-cloud-distance berechnet und so die Bodenpunkte ermittelt und extrahiert. [Zhang et al., 2016]

Der CSF verwendet die in Tabelle 2.1 aufgelisteten Parameter, welche vom Nutzer gesetzt werden müssen. Vor allem für Punktwolken mit flachen Böden können viele der Parameter auf Standardwerten belassen werden. Für steiles Gelände und starke Höhenunterschiede im Gelände funktioniert der CSF allerdings nicht mehr zuverlässig [Zhang et al., 2016] und es können keine Standardwerte verwendet werden. Hier müssen dann gegebenenfalls individuell für jede Punktwolke andere Parameter gesetzt werden.

Der CSF ist mittlerweile bekannt, findet in mehreren Publikationen Anwendung [Tockner et al., 2022; Gollob et al., 2020; Pérez-Martín et al., 2021] und wird von Jianbo Qi, einem der Autoren der Veröffentlichung [Zhang et al., 2016], in einem GitHub Repository unter der Apache-2.0-Lizenz

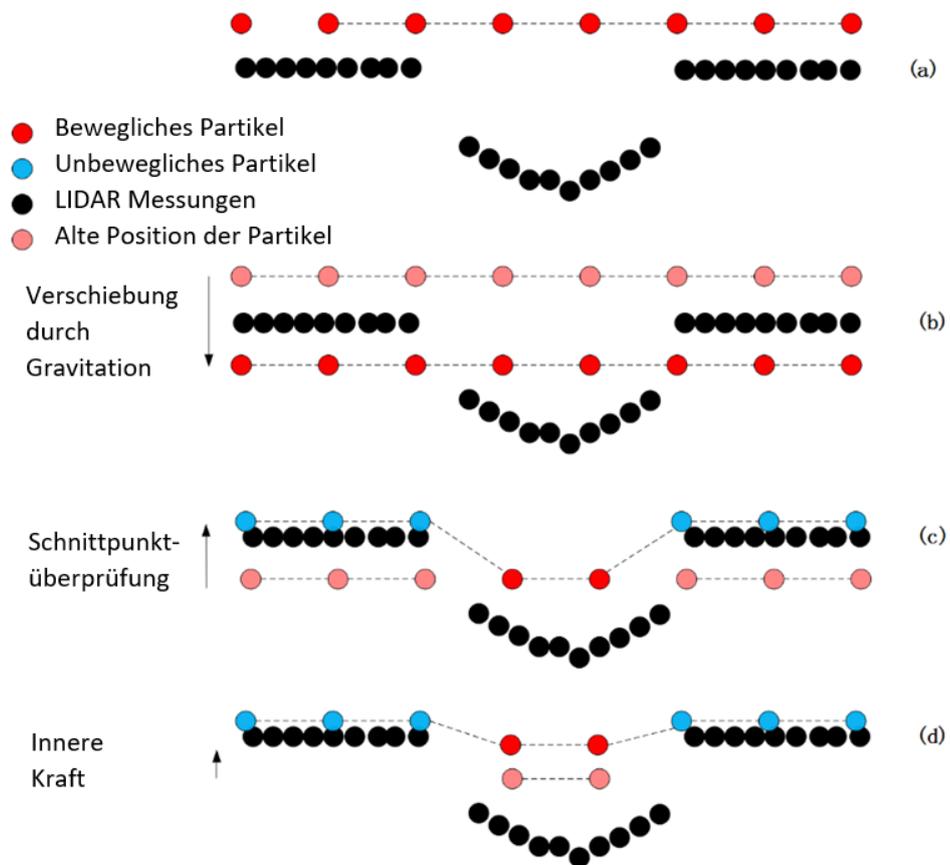


Abbildung 2.8: Funktionsweise des CSF. Englisch Originalbild aus [Zhang et al., 2016].

zur Verfügung gestellt [Qi, 2023]. Er kann in Python, Matlab, R oder C++ genutzt werden. Außerdem gibt es Plugins für die Programme CloudCompare und Point Cloud Magic [Qi, 2023].

Tabelle 2.1: CSF-Parameter mit Beschreibung und Standardwerten. Tabelle nach den Angaben in Zhang [oJ] und Qi [2023] erstellt.

Parameter	Beschreibung	Standardwert
rigidness	Je größer der Wert, desto steifer die „Cloth“. Mögliche Werte: 1, 2 oder 3	3
slop_smooth	Legt fest, ob die Nachbearbeitung für steile Hänge erforderlich ist oder nicht.	<i>False</i>
cloth_resolution	Der horizontale Abstand zwischen zwei Clothpartikeln (Auflösung des Clothgitters).	0,5
iterations	Maximale Anzahl an Iterationen der cloth simulation.	500
time_step	Zeitschritt für jede Iteration. Je kleiner, desto genauer kann das Ergebnis sein, aber desto mehr Rechenzeit wird benötigt.	0,65
terr_points_shiftx	Offset in x-Richtung für die ursprüngliche Punktwolke.	0,0
terr_points_shifty	Offset in y-Richtung für die ursprüngliche Punktwolke.	0,0
terr_points_shiftz	Offset in z-Richtung für die ursprüngliche Punktwolke.	0,0
class_threshold	Schwellenwert zur Unterteilung der Punktwolke in Boden- und Nicht-Boden-Punkte.	0,5

## 2.5 Zirkulare Hough-Transformation

Die Hough-Transformation ist eine weit verbreitete Bildverarbeitungstechnik zur Erkennung von Formen wie Linien, Kreisen und anderen Kurven. Sie wurde erstmals 1962 von Paul Hough als Methode zur automatischen Erkennung komplexer Linien in Bildern vorgeschlagen und patentiert [Hough, 1962]. Seitdem wurde sie auf die Erkennung anderer Formen ausgedehnt und ist heute ein grundlegendes Verfahren in der Computer Vision.

Das Ziel der Hough-Transformation ist, vorgegebene Referenzstrukturen wie zum Beispiel Geraden, Kreise oder Ellipsen in einem Bild zu finden. Eine signifikante Eigenschaft der Hough-Transformation ist dabei ihre Robustheit, was bedeutet, dass die im Bild vorhandenen Strukturen nicht exakt mit der Referenzstruktur übereinstimmen muss. So erkennt die Hough-Transformation auch verrauschte, fehlerhafte oder teilweise verdeckte Strukturen im Bild zuverlässig. [Nischwitz et al., 2011]

Die Hough-Transformation ist eine Parameterraumtransformation, die im Normalfall Bildmerkmale von kartesischen Koordinaten in einen Parameterraum umwandelt, der häufig polar ist [Duda & Hart, 1972]. Ursprünglich wurde die Hough-Transformation dazu entwickelt kollineare Punkte in Bildern zu detektieren, wozu die Gerade als Referenzstruktur dient [Hough, 1962]. Eine Gerade wird zum Beispiel durch die Hesse'sche Normalform eindeutig bestimmt:

$$r = x \cdot \cos(\varphi) + y \cdot \sin(\varphi) \quad (2.5.1)$$

Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen den  $x$ - und  $y$ -Koordinaten einer Gerade im kartesischen Koordinatensystem und der Länge  $r$  und des Winkels  $\varphi$  des Lots vom Koordinatenursprung auf die Gerade. Ebenso wie durch die  $x$ - und  $y$ -Koordinaten wird eine Gerade durch die  $r$ - und  $\varphi$ -Koordinaten eindeutig bestimmt. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2.9 verdeutlicht. [Nischwitz et al., 2011; Duda & Hart, 1972]

Werden die Geradenbüschel A und B (vgl. Abbildung 2.9) in den  $(r, \varphi)$ -Raum eingetragen, schneiden deren sinoidale Kurven sich in einem Punkt. Durch Diskretisierung des  $(r, \varphi)$ -Raums und Erhöhung der betroffenen Elemente des Akkumulators um eins werden kollineare Bildpunkte detektiert. Die Suche nach kollinearen Bildpunkten im Originalbild reduziert sich somit auf die Suche des maximalen Elements im Akkumulator. Die zugehörigen  $r$ - und  $\varphi$ -Werte bestimmen die

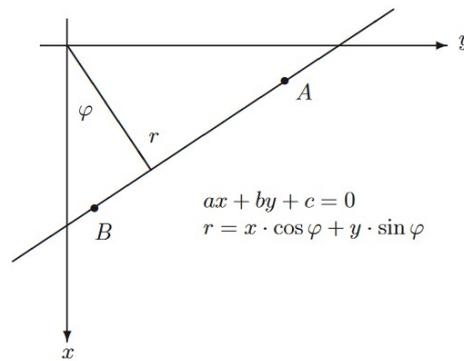


Abbildung 2.9: Zusammenhang zwischen der Hesse'schen Normalform der  $x$ - und  $y$ -Koordinaten und der  $r$ - und  $\varphi$ -Koordinaten einer Geraden [Nischwitz et al., 2011].

Gerade im  $(x, y)$ -Koordinatensystem, auf der die Bildpunkte liegen. [Nischwitz et al., 2011; Duda & Hart, 1972]

In ähnlicher Weise funktioniert die Hough-Transformation zur Erkennung von Kreisen, indem sie jedes Kantenpixel im Bild in eine Reihe von Parametern transformiert, die einen Kreis im Parameterraum definieren. Zu den Parametern gehören in der Regel die Mittelpunktskoordinaten und der Radius des Kreises. Die Hough-Transformation akkumuliert dann diese Parametersätze, und die Spitzen im akkumulierten Raum entsprechen den Kreisen im Bild. [Rizon et al., 2005; scikit image, oJ]

## 2.6 City Geography Markup Language (CityGML)

CityGML ist ein offener und international anerkannter Standard des Open Geospatial Consortium (OGC). Es definiert ein Format für den Austausch, die Darstellung und Speicherung von virtuellen 3D-Stadtmodellen, sowie ein konzeptionelles Modell [OGC, 2023b; Kutzner et al., 2020; Gröger & Plümer, 2012]. Beides ist über die GitHub Repositories des OGC frei zugänglich [OGC, 2021a, 2023a]. Darüber hinaus gibt es detaillierte Dokumentationen auf der Webseite des OGC [OGC, 2023b].

Mit CityGML können die wichtigsten topografischen Objekte in städtischen oder regionalen Kontexten im Hinblick auf ihr Erscheinungsbild, ihre dreidimensionale Geometrie, ihre Topologie und Semantik einheitlich modelliert werden [Gröger & Plümer, 2012]. Die aktuelle Version ist CityGML 3.0, welche im Vergleich zu den Vorgängerversionen 1.0 und 2.0 das zugrunde liegende Informationsmodell und nicht mehr das Geography Markup Language (GML)-Austauschformat standardisiert [OGC, 2023b; Kutzner et al., 2020]. Durch das konzeptionelle Modell von CityGML 3.0 wird ein semantisches Informationsmodell beschrieben, welches die geometrische Darstellung,

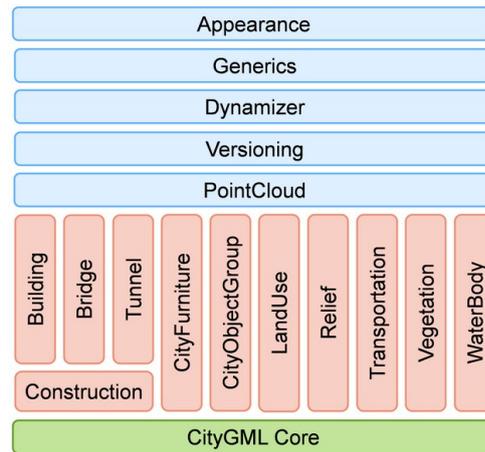


Abbildung 2.10: Überblick über die CityGML 3.0 Module [OGC, 2021b]. Die vertikalen roten Kästen zeigen die verschiedenen thematischen Module. Die horizontalen blauen Module geben Konzepte an, die auf alle thematischen Module anwendbar sind. Das grüne Core-Modul stellt die Basis für alle Module dar.

sowie Beziehungen und Attribute der modellierten Objekte definiert [OGC, 2021b]. Anders als der Name CityGML suggeriert, wird die Kodierung der Daten sowohl in GML beziehungsweise Extensible Markup Language (XML), als auch in JavaScript Object Notation (JSON) und diversen Datenbankschemata unterstützt [OGC, 2023b, 2021a]. Zum Zeitpunkt der Masterarbeit ist für die Version 3.0 des CityGML-Standards bisher lediglich das Konzeptmodell veröffentlicht worden. Die CityGML-3.0-GML-Kodierungsspezifikationen befinden sich noch in der Entwicklung und werden zu einem späteren Zeitpunkt als separater Kodierungsstandard veröffentlicht [OGC, 2023b]. Die Versionen 1.0 und 2.0 dagegen wurden 2008 beziehungsweise 2012 veröffentlicht und alle Dokumente und XML-Schemas sind über die Webseite des OGC zugänglich [OGC, 2023b].

Das Hauptziel von CityGML ist die Erleichterung der Interoperabilität und des Datenaustauschs zwischen verschiedenen Akteuren in den Bereichen Stadtplanung, Architektur, Verkehr und Umweltmanagement durch die Bereitstellung einer umfassenden und flexiblen Darstellung der städtischen Umgebung in 3D [Gröger & Plümer, 2012; OGC, 2012]. CityGML ermöglicht die Erstellung mehrstufiger Darstellungen in verschiedenen Level of Detail (LoD) von Stadtobjekten, einschließlich ihrer Geometrie, Topologie, Semantik und ihres Aussehens. Des Weiteren unterstützt CityGML eine Reihe von Anwendungsfällen, von der Visualisierung und Simulation bis zur Analyse und Entscheidungsfindung [Kutzner et al., 2020; Gröger & Plümer, 2012].

Da es viele verschiedene Anwendungsbereiche für semantische 3D-Stadt- und Landschaftsmodelle gibt, ist das CityGML-Modell modularisiert, was in Abbildung 2.10 gezeigt wird [OGC, 2021b, 2012, 2008]. Dafür werden von CityGML die wichtigsten Objekttypen für virtuelle 3D-

Stadtmodellen als getrennte Module definiert. Diese wurden als erforderlich oder wichtig für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche identifiziert. So können Implementierungen je nach ihrem spezifischen Informationsbedarf eine Teilmenge des gesamten Modells verwenden und entsprechen immer noch den Anforderungen des CityGML-Standards [OGC, 2021b, 2012, 2008]. Als Grundlage für alle Erweiterungsmodule dient das CityGML-Core-Modul (vgl. Abbildung 2.10), welches die Basiskomponenten des CityGML-Datenmodells definiert und von jedem konformen System implementiert werden muss [OGC, 2021b, 2012, 2008].

### 2.6.1 Vegetationsmodul

Für die folgende Anwendung von CityGML zur Darstellung von Baumobjekten in 3D-Stadtmodellen ist insbesondere das Vegetationsmodul von Bedeutung. Das Unified Modeling Language (UML) Diagramm des Vegetationsmoduls von CityGML 2.0 ist in Abbildung 2.11 dargestellt und definiert das Konzept zur Darstellung von Vegetation in Stadtmodellen [OGC, 2021b]. Die UML-Diagramme der Versionen 1.0 und 3.0 unterscheiden sich von Version 2.0 im Wesentlichen lediglich durch die Anzahl der Attribute und können in den jeweiligen Standards [OGC, 2008] und [OGC, 2023a] eingesehen werden. Die abstrakte Superklasse des Moduls stellt das *AbstractVegetationObject* dar. Es hat mit den Klassen *PlantCover* und *SolitaryVegetationObject* lediglich zwei Top-Level-Feature-Typen [OGC, 2012, 2021b]. Vegetation kann demnach entweder als Vegetationsflächen oder als solitäre Vegetationsobjekte repräsentiert werden. Beispiele für Vegetationsflächen sind Biotope, Felder, Wälder oder andere Vegetationsgemeinschaften, während solitäre Vegetationsobjekte Bäume oder einzelne große Sträucher darstellen [OGC, 2012, 2008]. Für die Modellierung eines Baumkatasters ist hier vor allem die Klasse *SolitaryVegetationObject* interessant, welche auch von Hurst & Geiger [2020] in der CityGML-Version-2.0 genutzt wird. Sie besitzt typische Baumkatasterattribute wie zum Beispiel Stammdurchmesser, Baumhöhe, Kronendurchmesser oder Baumart [OGC, 2012, 2021b]. Durch die semantische Modellierung der Bäume im Zusammenhang mit einem 3D-Stadtmodell in CityGML können verschiedene Simulationen beispielsweise der Stadtbelüftung, des Mikroklimas [OGC, 2012, 2008], des Solarpotentials oder Sichtbarkeitsanalysen [Hirt & Stilla, 2023] im urbanen Raum durchgeführt werden.

### 2.6.2 Geometriemodell

Die räumlichen Eigenschaften von CityGML-Features werden in CityGML 1.0 und 2.0 durch geometrische Primitive einer Teilmenge des GML3-Geometriemodells repräsentiert [OGC, 2016, 2012, 2008]. Die folgenden beiden Restriktionen gelten dabei: Erstens können *GM\_Curves* nur linear sein [OGC, 2016]. Das heißt es können nur *LineStrings* und *LinearRings* verwendet werden.

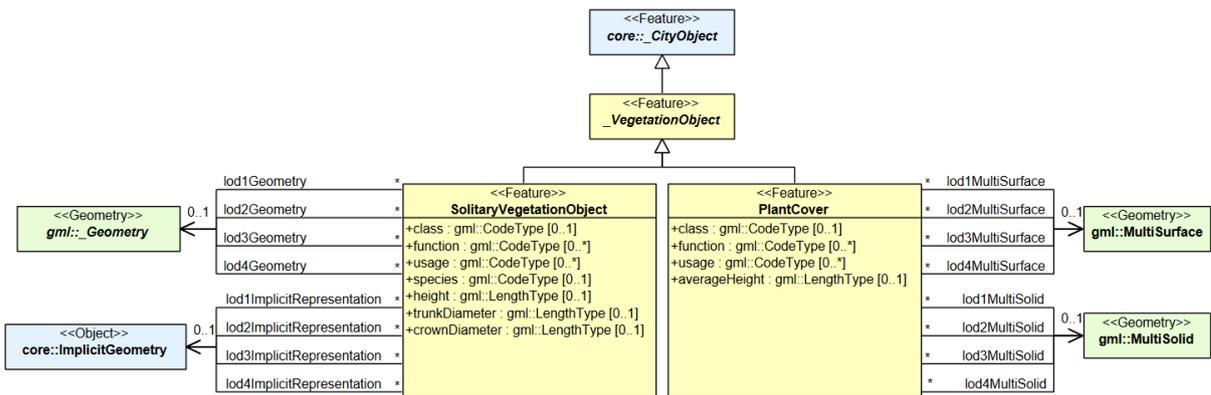


Abbildung 2.11: UML-Diagramm des Vegetationsmoduls von CityGML 2.0 [OGC, 2012]. Präfixe repräsentieren XML-Namensräume, welche mit Modellelementen verbunden sind. Elementnamen ohne Präfixe werden innerhalb des Vegetationsmoduls definiert.

Zweitens können *GM\_Surfaces* nur planar sein, woraus folgt, dass nur Polygone verwendet werden können [OGC, 2016; Gröger & Plümer, 2012]. Das so definierte Profil von GML3 ist als UML-Diagramm in Abbildung 2.12 dargestellt. Dieses Geometriemodell basiert auf dem Internationale Organisation für Normung (ISO)-Standard 19107 [OGC, 2012, 2008], welcher ein Raumbezugschema definiert [ISO/TC 211 Geoinformation/Geomatik, 2003].

Im Kontext zur Modellierung von Vegetation sind die Geometrierepräsentationen *MultiSolid* und *MultiSurface* am relevantesten. Während *PlantCover*-Features auf diese beiden Geometrien beschränkt sind, können *SolitaryVegetationObject*-Features durch jede der in Abbildung 2.12 dargestellten Geometrien repräsentiert werden [OGC, 2012, 2008]. In der neuesten Version von CityGML sind dagegen im bereits veröffentlichten konzeptionellen Modell theoretisch alle Geometrien des ISO-19107-Standards erlaubt [OGC, 2021b], wobei allerdings im UML-Diagramm der Geometrie wiederum die Geometrien auf eine Teilmenge des GML3-Geometriemodells beschränkt definiert werden [OGC, 2021b]. Weitere Geometrien können dem Datenmodell über eine Application Domain Extension (ADE) hinzugefügt werden, um das konzeptionelle Modell formal und systematisch für eine spezifische Anwendung zu erweitern [OGC, 2021b]. Eine solche spezifische Anwendung könnte beispielsweise ein Baumkataster sein, sofern die Approximierung über Flächensegmente nicht ausreicht.

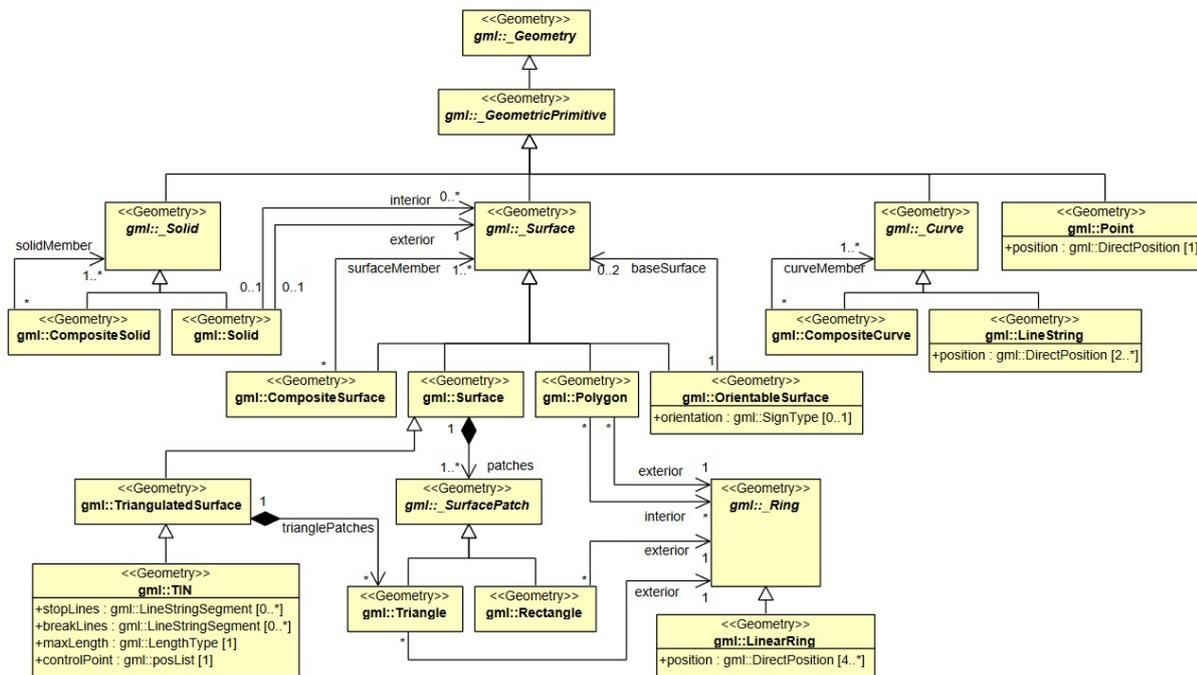


Abbildung 2.12: UML-Diagramm des Geometriemodells von CityGML 2.0, was ein Subset des GML3-Geometriepakets ist [OGC, 2012].

---

## 3 Methodik und Implementierung

---

Dieses Kapitel behandelt die entwickelte Methodik und Implementierung zur automatischen Generierung eines Baumkatasters aus Punktwolken, welche im Ablaufdiagramm in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Dabei symbolisieren die hellblauen Rechtecke Ablaufschritte, während die Ergebnisse in grauen Hexagonen dargestellt sind. Das Herzstück der entwickelten Methodik bildet die Extraktion von Baumparametern, welche die benötigten Metriken für das Baumkataster liefert. Das Vorgehen hierzu ist in einem separaten Ablaufdiagramm in Abbildung 3.4 veranschaulicht und verwendet dieselbe Darstellungssymbolik wie Abbildung 3.1. Die Schritte davor dienen mehrheitlich zur Vorbereitung der Punktwolke und zur Datenreduktion, während der Ablauf nach der Extraktion der Baumparameter zur Datenbereitstellung und geeigneten Visualisierung für ein Baumkataster im standardisierten CityGML-Format verwendet wird. Ein Gesamtabbild beider Ablaufdiagramme respektive der Methodik ist zur Übersicht im Anhang D in Abbildung D.1 dargestellt, um den Zusammenhang beider Abläufe visuell herzustellen.

### 3.1 Datenaufnahme und Vorverarbeitung

Am Anfang steht die Datenaufnahme, wofür unterschiedliche Methoden wie MLS, TLS oder PLS angewendet werden können. Die gängigsten Methoden werden in den Kapiteln 2.1 und 4 behandelt. Für das entwickelte Verfahren ist es unerheblich, welche Aufnahmemethodik angewandt wird, solange die Bäume möglichst komplett in der Punktwolke abgebildet sind. Wichtig ist hierbei, dass die gesamte Länge der Bäume vom Stammfuß bis zur Kronenspitze in der Punktwolke enthalten ist. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass Aufnahmeverfahren aus der Luft, wie zum Beispiel ALS, weniger geeignet sind als Laserscanning-Methoden vom Boden aus. Unabhängig von der Art und Weise der Datenaufnahme werden in einer Aufnahmesession meist mehrere Punktwolken gewonnen, welche kombiniert die Informationen eines Gebietes ergeben. Diese Punktwolken haben neben den obligatorischen Koordinaten der Punkte oft noch weitere Attribute wie Intensitätswerte oder Farbinformationen.

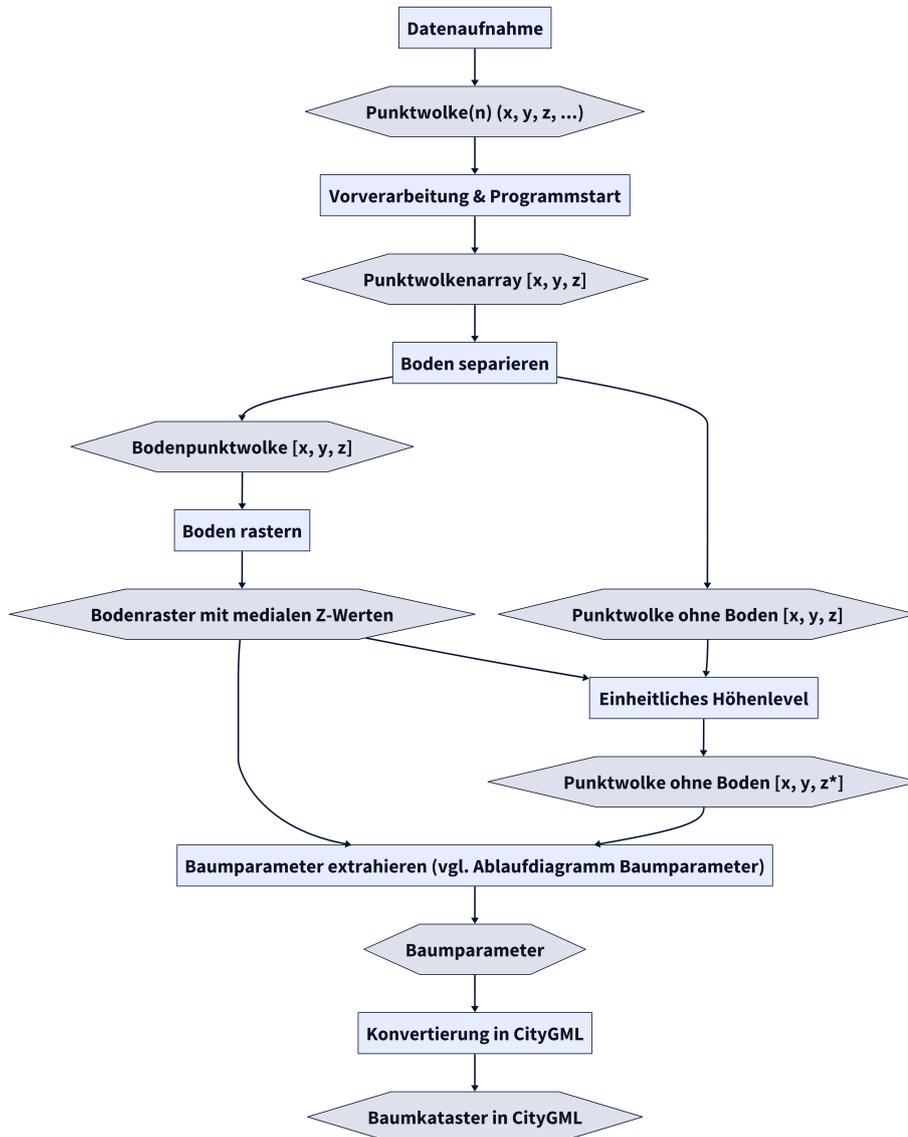


Abbildung 3.1: Entwickelte Methodik als Ablaufdiagramm (eigene Darstellung). Die hellblauen Rechtecke symbolisieren Arbeitsschritte, während die grauen Hexagone die Ergebnisse aus den Arbeitsschritten beinhalten.

Bei der Vorverarbeitung, welche sich an [Hirt et al., 2021b] orientiert, werden die einzelnen Punktwolken zu einer oder mehreren großen Punktwolken zusammengefügt und georeferenziert. Des Weiteren werden grobe Ausreißer und Rauschen mit Hilfe eines schwachen Statistical Outlier Removal (SOR)-Filters entfernt, sowie nicht-endliche Werte und Intensitätswerte von 0 und 255 eliminiert. Darüber hinaus ist vor allem bei MLS-Punktwolken eine Entfernung von Punktduplikaten sinnvoll, da durch Ampeln oder ähnlichen den Verkehrsfluss störenden Ereignissen eine gleichmäßige Datenaufnahme nicht gegeben ist. Diese Schritte dienen unter anderem dazu, die oft sehr großen Dateigrößen zu verkleinern und die Punktwolken bestmöglich für die weitere Verarbeitung vorzubereiten. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Vorverarbeitung gleichzeitig so gering wie möglich gehalten wird, da Vegetation in Punktwolken leicht als Rauschen fehlinterpretiert wird [Goebel et al., 2023]. Ein Teil der Vorverarbeitung findet vor dem Einlesen in das Programm statt und ist vom automatisierten Workflow ausgenommen, da dies eher der Datenaufnahme und -bereitstellung als der Auswertung der Daten zuzuordnen ist. Abhängig vom Datensatz und den bereits erfolgten Vorverarbeitungsmaßnahmen werden im automatisierten Programm gegebenenfalls die genannten Vorverarbeitungsmethoden direkt nach dem Einlesen vorgenommen.

Zur weiteren Verarbeitung liegt danach die Punktwolke in der Form eines dreidimensionalen ungeordneten Arrays mit der Koordinateninformation der Punkte vor. Das Array stellt ein geeignetes Datenformat zur weiteren Verarbeitung der Punktwolke dar, da diese so leicht modifiziert werden kann und Zugriffe auf die einzelnen Punkte unkompliziert möglich sind.

## 3.2 Bodenverarbeitung

Der nächste Schritt, bevor die Extraktion von Baumparametern erfolgen kann, ist die Trennung der Bodenpunkte von der restlichen Punktwolke. Dies dient dazu die Datenmenge weiter zu verringern, sowie eine Referenzfläche für die Baumhöhenermittlung zu schaffen. Außerdem wird für die spätere Extraktion der Baumparameter eine Punktwolke ohne Boden benötigt (vgl. Kapitel 3.3). Zur Separierung der Bodenpunkte von den restlichen Punkten der Punktwolke wird der CSF verwendet, welcher in Kapitel 2.4 näher beleuchtet wird. Der Algorithmus ist bekannt und weit verbreitet [Tockner et al., 2022; Gollob et al., 2020; Pérez-Martín et al., 2021], weshalb er sich für das zu entwickelnde Programm anbietet. Darüber hinaus separiert er im überwiegend ebenen Gelände die Bodenpunkte zuverlässig und mit geringer Laufzeit, während er im steilen Gelände an seine Grenzen stößt [Zhang et al., 2016]. Da das Programm hingegen für den urbanen Raum konzipiert ist, wird davon ausgegangen, dass in den Eingangsdaten mehrheitlich flaches Gelände

vorherrschen wird. Dies gilt insbesondere für die verwendeten Beispieldatensätze (vgl. Kapitel 4), die aus München stammen.

Die Implementierung des CSF wird in einem GitHub-Repository von Qi [2023] unter der Apache-2.0-Lizenz bereitgestellt. Diese Implementierung nutzt Open Multi-Processing (OpenMP), um Prozesse zu parallelisieren und so die Leistung des Programms zu steigern. OpenMP ist ein Application Programming Interface (API), das plattformübergreifende parallele Programmierung in C, C++ und Fortran ermöglicht [OpenMP, 2023]. Da die Parallelisierung zu variablen, nicht reproduzierbaren Ergebnissen führt, wurde der Code für diese Arbeit dahingehend verändert und OpenMP deaktiviert.

Nach der Anwendung des CSF liegen die Punktwolke ohne Boden und die Bodenpunktwolke in zwei getrennten Arrays vor (vgl. Abbildung 3.1). Die Bodenpunktwolke dient im Folgenden zur Herstellung einer Höhenreferenzfläche, während aus der Punktwolke ohne Boden die Baumparameter extrahiert werden.

In den meisten wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Bestimmung von Baumparametern wird ein DGM generiert, welches die Höheninformationen für die Ermittlung der Baumhöhen enthält [Simonse et al., 2003; Aschoff et al., 2004; Weiser et al., 2022; Hurst & Geiger, 2020]. Außerdem kann auch ein definierter  $z$ -Wert die Höhenreferenzfläche repräsentieren, wie es in [Zintl, 2021] gezeigt wird. Dieser Ansatz führt allerdings zu erheblichen Ungenauigkeiten der Baumhöhen, da ein einzelner  $z$ -Wert nur unzureichend unebene oder schiefe Böden repräsentieren kann. Deshalb wurde hier ein eigenes Verfahren entwickelt, welches einfacher gehalten ist als die direkte Nutzung eines DGMs, aber dennoch unebenen und schiefen Böden gerecht wird. Es beruht auf der Rasterung des Bodens und Anpassung der Höhenwerte der Punktwolke abhängig vom zugehörigen Bodenraster. Dabei repräsentieren die separierten Bodenpunkte aus dem CSF ähnlich zu einem DGM die Höhenreferenzfläche für die Ermittlung der Baumhöhen. Um in der späteren Reduktion der Punktwolke in den 2D-Raum Ebenen auf derselben Baumhöhe aus der Punktwolke ausgliedern zu können, müssen alle Bäume auf demselben Höhenlevel stehen.

Dazu wird zunächst die Bodenpunktwolke mit einer definierten Schrittweite in der horizontalen  $x$ - $y$ -Ebene gerastert. Bei ebenen Böden kann dieses Raster im Meterbereich gesetzt werden. Je unebener und steiler der Boden ist, desto feiner muss das Raster gewählt werden. Der Standardwert wurde auf 1 m festgelegt. Zum einen ist dieser Wert für relativ große Objekte wie Bäume ausreichend, welche oft eine noch viel größere Querschnittsfläche haben. Zum anderen repräsentiert dieser Wert auch unebenes oder steiles Gelände gut. Darüber hinaus ist die Laufzeit für

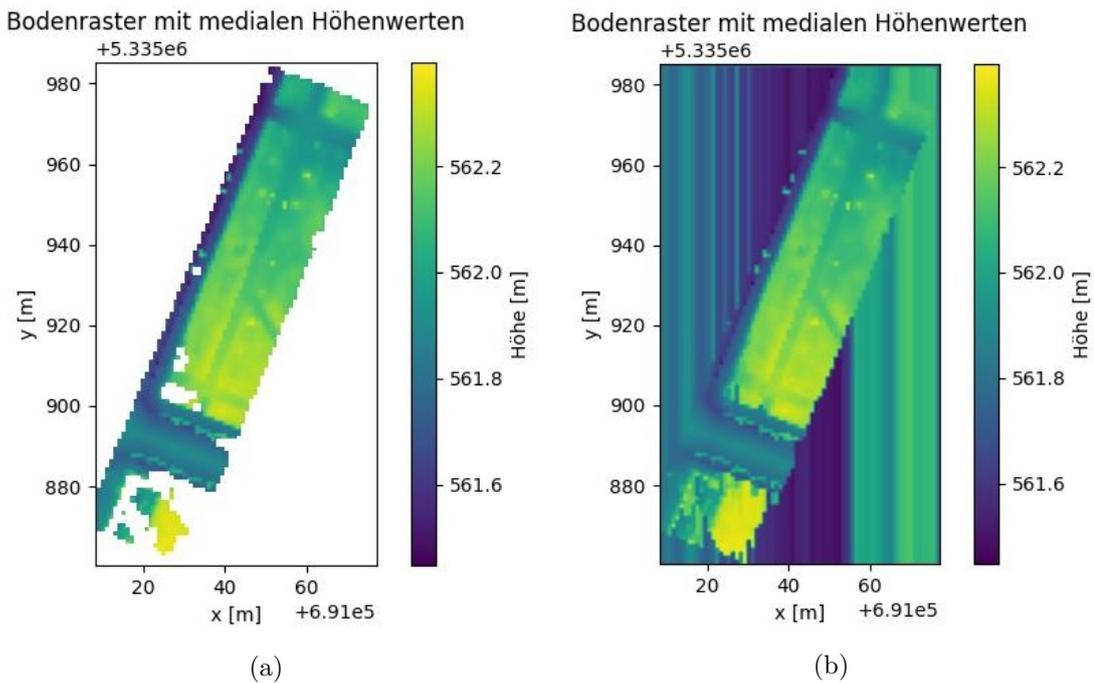


Abbildung 3.2: Darstellungen des Bodenrasters mit medialen Höhenwerten des Südteils der Arcisstraße (eigene Darstellung). Eine Darstellung der zugrundeliegenden Punktwolke zeigt Abbildung 4.4b. a Plot ohne Lücken- und Randbehandlung. b Plot mit Lücken- und Randbehandlung.

die Testdatensätze (vgl. Kapitel 5.6) mit dieser Schrittweite gering. Bei sehr ebenen Böden und großen Datensätzen kann es sinnvoll sein, die Schrittweite zu vergrößern. Wird die Schrittweite gleich der Ausdehnung der Punktwolke in x- beziehungsweise y-Richtung gewählt, definiert der mediale Höhenwert aller Bodenpunkte die Höhenreferenzfläche. Bei quadratischer Ausdehnung ist dies äquivalent zur Festlegung eines Höhenwerts als Referenzhöhe für die gesamte Punktwolke (vgl. [Zintl, 2021]).

Zur Initialisierung wird das Bodenraster mit dem Median-z-Wert aller Bodenpunkte gefüllt. Anschließend wird spaltenweise über jede Bodenrasterzelle iteriert. Der Median der z-Werte aller Bodenpunkte, die in die jeweilige Bodenrasterzelle fallen, legen den Rasterzellenwert fest. Liegt in einer Bodenrasterzelle kein Punkt vor, wird der letzte berechnete Median verwendet. So wird sichergestellt, dass Löcher oder leere Randbereiche der Bodenpunktwolke ebenfalls gefüllt werden. Dabei wird der letzte berechnete Median genutzt, da benachbarte Zellen meistens ein ähnliches Höhenlevel besitzen und so vor allem Lücken im mittleren Teil des Bodens sinnvoll gefüllt werden. Dies wird in Abbildung 3.2 verdeutlicht, welche das resultierende Höhengitter exemplarisch anhand eines Testdatensatzes der Arcisstraße (Kapitel 4.1) zeigt. Der linke Plot zeigt dabei das Höhengitter ohne Lücken- und Randbehandlung (Abbildung 3.2a), während auf der rechten Seite das später verwendete komplett gefüllte Höhengitter (Abbildung 3.2b) dargestellt ist. Bei der Be-

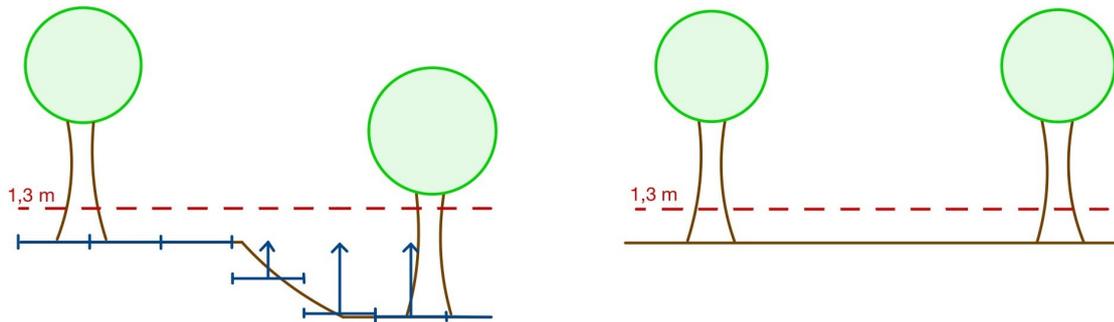


Abbildung 3.3: Veranschaulichung der Bodenprozessierung (eigene Darstellung). Die blauen Linien symbolisieren die Rasterung des Bodens und die resultierende Höhenänderung, während die rot gestrichelte Linie die BHD-Bezugshöhe von 1,3 m Höhe darstellt.

trachtung des rechten Bodenplots fällt vor allem das Streifenmuster der Rand- beziehungsweise Lückenbehandlung auf, da die Berechnung der Rasterzellenwerte spaltenweise erfolgt.

Mit Hilfe dieses so entstandenen Bodenhöhengitters wird die restliche Punktwolke in ihren Höhenwerten verändert, sodass anschließend eine einheitliche Höhenbezugsfläche entsteht. Dazu wird von jedem Punkt der Punktwolke der entsprechende Medianwert der zugehörigen Rasterzelle subtrahiert. Der Boden wird dadurch künstlich geebnet (vgl. Abbildung 3.3). Nach diesem Schritt befinden sich alle Bäume auf derselben Höhe, welche die Referenzhöhe repräsentiert und die spätere Bestimmung der Baumhöhen ermöglicht. Zudem ist es nun möglich zum Boden parallele Schichten auf einheitlichen Baumhöhen aus der Punktwolke auszuschneiden. Dies ist vor allem zur Bestimmung des BHD auf einer definierten Höhe von 1,3 m wichtig. Das geschilderte Vorgehen ist in Abbildung 3.3 zum besseren Verständnis illustriert. Nach diesem Schritt liegt die Punktwolke mit angepassten Höhenwerten und eliminiertem Boden vor (vgl. Abbildung 3.1).

### 3.3 Extraktion von Baumparametern

Als nächstes folgt mit der Extraktion der Baummetriken der wichtigste und komplexeste Teil der entwickelten Methodik. Das Vorgehen hierzu ist separat im Ablaufdiagramm in Abbildung 3.4 dargestellt. Hierbei wird zum Großteil die Methodik aus der Bachelorarbeit von Zintl [2021] angewendet, welche sich wiederum an der Methodik von Simonse et al. [2003] und Aschoff et al. [2004] orientiert. Ein ähnliches Vorgehen verwendet auch eine neuere Publikation von Weiser et al. [2022]. Der Ansatz beruht darauf, unterschiedliche Rasterbilder aus extrahierten Schichten in definierten Abständen aus der Punktwolke zu erstellen. Die Schichtdicken, Abstände und

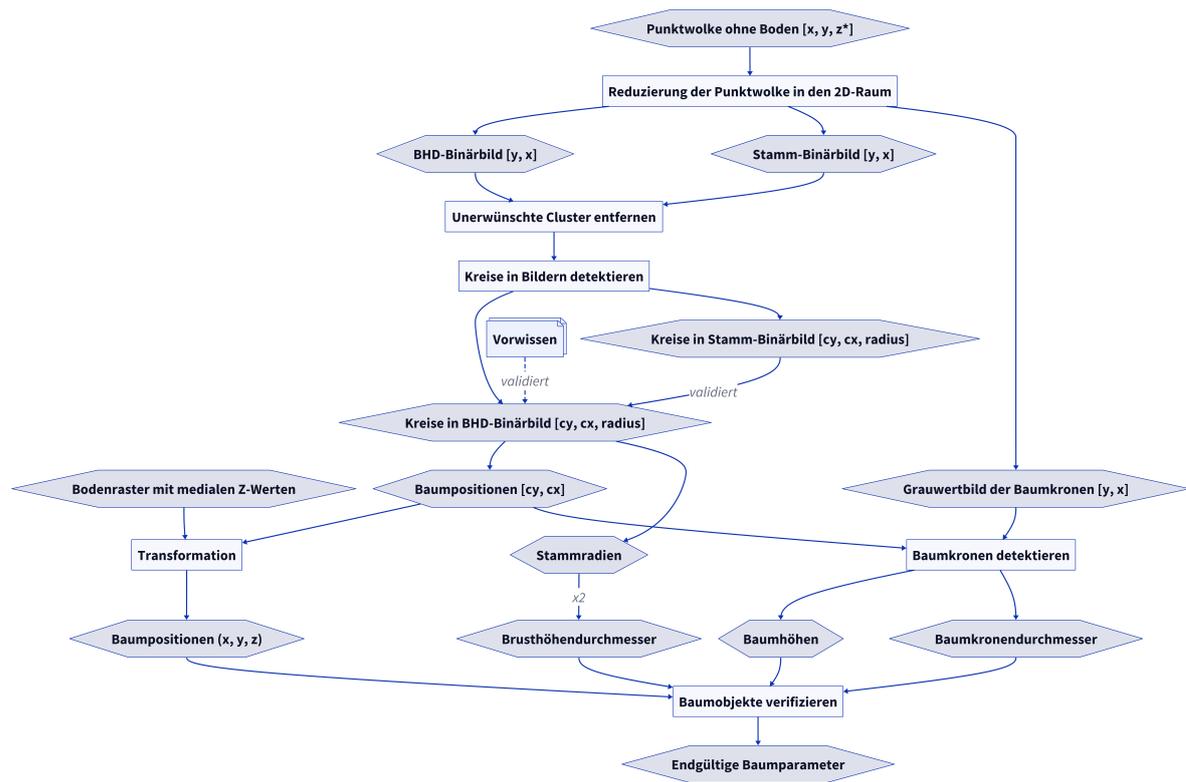


Abbildung 3.4: Entwickelte Methodik zur Extraktion der Baumparameter als Ablaufdiagramm (eigene Darstellung). Die Rechtecke symbolisieren Arbeitsschritte, während die Hexagone die Ergebnisse aus den Arbeitsschritten beinhalten.

Bildspezifikationen, wie zum Beispiel die Pixelgröße, variieren je nach Publikation, während das Konzept dasselbe bleibt. Die Rasterbilder dienen dann zur Bestimmung des Baumfußpunktes, des BHD und teilweise der Baumhöhe durch Anwendung von Bildverarbeitungsmethoden. Dies hat zudem den Vorteil, dass die Datenmenge durch die Projektion in den 2D-Raum erheblich reduziert wird. Als Ausgangsbasis dient die zuvor generierte Punktwolke mit einheitlichem Höhenlevel der Bäume und ohne Boden. Darüber hinaus wird das Bodengitter für die Bestimmung der z-Koordinaten der Baumpositionen erneut benötigt. Als erstes wird die Punktwolke in drei Rasterbilder in den zweidimensionalen Raum reduziert. Aus diesen Bildern können anschließend sukzessive die vier Baumparameter BHD, Baumposition, Baumhöhe und Baumkronendurchmesser für jeden detektierten Baum extrahiert werden.

### 3.3.1 Reduzierung der Punktwolke in den 2D-Raum

Das erste Bild wird im Folgenden „BHD-Binärbild“ genannt, da es den Brusthöhenbereich beinhaltet und zur Bestimmung der BHD dient. Darüber hinaus wird aus diesem Bild die Lage der Baumfußpunkte ermittelt. Es wird dabei ausgenutzt, dass die in der Punktwolke enthaltenen

Baumstämme sich als Kreise im zweidimensionalen Raum abzeichnen. Das BHD-Binärbild wird aus einer 20 cm dicken Punktwolkschicht zwischen 1,2 m und 1,4 m Höhe histogrammbasiert erstellt. Die Schichtdicke von 20 cm wurde analog zu Zintl [2021] relativ dick gewählt, damit auch in Punktwolken mit geringer Punktdichte genug Punkte vorhanden sind, um klare Kreisstrukturen abzubilden. In anderen Publikationen von Simonse et al. [2003] und Weiser et al. [2022] werden geringere Schichtdicken von 10 cm beziehungsweise 4 cm extrahiert.

Zur späteren Validierung der Ergebnisse des BHD-Binärbildes wird ein zweites Binärbild aus der Punktwolke erstellt. Es wird aus einer 1 m starken Schicht zwischen 0,4 m und 1,4 m aus der Punktwolke erstellt und beinhaltet somit den Großteil der Stammlänge. Deshalb wird es im Folgenden „Stamm-Binärbild“ genannt. Der untere Bereich des Stamms wird ausgespart, da dieser dort oft breiter und unförmiger ist als im oberen Bereich. Darüber hinaus ist der untere Teil oft mit niedriger Vegetation, Pilzen oder Laubhaufen bedeckt oder geht schon oberirdisch in den Wurzelballen über. Mit der Hilfe des Stamm-Binärbildes soll die Anzahl der im BHD-Binärbild falsch detektierten Bäume verringert werden, da im Stamm-Binärbild kreisförmige Objekte aus dem BHD-Binärbild durch die dickere Schichtdicke nicht mehr unbedingt als Kreise erscheinen. Baumstämme dagegen sollten in beiden Bildern klar als kreisförmige Strukturen zu erkennen sein.

Die Pixelgröße der beiden Binärbilder muss passend zur Punktdichte, -verteilung und Größe der Punktwolke gewählt werden und ist damit abhängig vom Datensatz. Dabei sollte beachtet werden, dass sie das Ergebnis im Hinblick auf die Anzahl der detektierten Bäume und die Laufzeit beeinflusst. Darüber hinaus wirkt sie sich auf die Genauigkeit der Baumstandorte, der BHD und des Baumkronendurchmessers aus. Bei der Generierung des Binärbildes wird nach Zintl [2021] jedes Pixel, welches mindestens einen Punkt aus der Punktwolke enthält, auf 1 gesetzt. Alle anderen Pixel erhalten dementsprechend den Wert 0. Bei sehr verrauschten Datensätzen kann es Sinn machen die Toleranz zu erhöhen und ein Pixel erst bei mehr als einem Punkt auf den Wert 1 zu setzen.

Das dritte aus der Punktwolke erstellte Rasterbild dient zur Ermittlung der Baumkronendurchmesser sowie der Baumhöhen. Es ist im Gegensatz zu den anderen beiden Bildern kein Binärbild, sondern ein Grauwertbild. Dabei wird die gesamte auf das Bodenniveau normalisierte Punktwolke in ein 2D-Rasterbild projiziert, wobei die Höheninformationen als Grauwerte im Bereich von 0 bis 255 kodiert werden. Der höchste Punkt, der in ein Bildraster fällt, bestimmt dabei den Grauwert. So ist es möglich zur späteren Ermittlung der Baumhöhen wieder auf die Höheninformationen zuzugreifen. Eine andere Möglichkeit zeigen Aschoff et al. [2004]. Sie erstellen ebenfalls

Grauwertbilder, kodieren die Grauwerte der Pixel aber anhand der Anzahl der Punkte, die in ein Pixel fallen. So wird die Punktdichte der Punktwolke abgebildet. Dies macht allerdings bei der Verwendung von MLS-Punktwolken weniger Sinn, da durch die Aufnahme in der Bewegung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auch unterschiedliche Punktdichten in der Punktwolke entstehen. Darüber hinaus ist die Höheninformation nicht mehr im Bild vorhanden, welche im Folgenden zur Baumhöhenbestimmung verwendet wird.

Die Pixelgröße des Grauwertbildes kann größer gewählt werden als die Pixelgröße der beiden Binärbilder, da der Genauigkeitsanspruch an die Baumhöhe beziehungsweise an den Baumkronendurchmesser geringer ist als der an den BHD oder die Baumposition (vgl. Kapitel 2.3). Außerdem ist die Datenmenge zur Erstellung des Grauwertbildes durch die Verwendung der gesamten Punktwolke größer. Durch die Wahl einer größeren Pixelgröße verringert sich der Berechnungsaufwand und somit die Laufzeit des Programms. Als Standardwert für die Pixelgröße des Grauwertbildes werden demnach 10 cm angenommen, was zudem derselbe Wert wie bei [Zintl, 2021] ist.

### 3.3.2 Brusthöhendurchmesser und Baumpositionen

Die BHD der Bäume und die Positionen der Baumfußpunkte werden mit Hilfe des BHD-Binärbilds und des Stamm-Binärbilds bestimmt. Dazu müssen alle Bäume als einzelne Objekte segmentiert werden, welche als Kreise in den Bildern erscheinen. Zur Detektion der kreisförmigen Strukturen wird wie in [Zintl, 2021; Simonse et al., 2003; Aschoff et al., 2004] eine zirkulare Hough-Transformation eingesetzt.

Um das Ergebnis der Hough-Transformation zu verbessern, werden im Vorhinein größere unerwünschte Cluster aus den Binärbildern entfernt, wodurch zum Beispiel Gebäude, lange Mauern und größere Fahrzeuge mehrheitlich eliminiert werden. Dazu werden die Bilder zunächst mit den morphologischen Transformationen Opening und Closing behandelt, um Konturen zu verbinden, abzurunden und Rauschen zu entfernen. Anschließend werden die zuvor genannten größeren Cluster anhand der Pixelanzahl entfernt, wobei sichergestellt werden muss, dass die Baumstämme in den Binärbildern enthalten bleiben. Dazu wird ein Bereich in Pixeln definiert in dem die Cluster beibehalten werden sollen und welcher von der Pixelgröße abhängt. Die untere Grenze wird auf den Wert 1 Pixel gesetzt, sodass kleine Cluster beibehalten werden. So wird verhindert, dass Teile von Baumstammkreisen, die oft aus einzelnen kleinen Fragmenten bestehen, entfernt werden. Die obere Grenze wird durch folgende Formel, welche die Anzahl an Pixeln  $n$  [pxl] in einem maximalen Baumstammkreis berechnet, bestimmt:

$$n = \frac{\pi \cdot dbh_{max}^2}{4 \cdot pxlsize\_binary\_img^2} \quad (3.3.1)$$

Dies geschieht abhängig von der Pixelgröße der Binärbilder *pxlsize\_binary\_img* [m] und einem maximalen Stammdurchmesser *dbh<sub>max</sub>* von 1 m. Der Wert 1 m für den maximalen Stammdurchmesser wurde nach den Informationen zu Stadtbäumen aus [Rötzer et al., 2021] gewählt. Alle dort aufgelisteten typischen Baumarten haben in jedem Alter einen kleineren BHD. Darüber hinaus sind die Baumstammkreise in den Bildern im Normalfall nicht komplett mit weißen Pixeln gefüllt, da das Innere der Baumstämme nicht von einem Laserscanner aufgenommen werden kann. Zudem erfolgt die Aufnahme meist nur von einer Seite, wodurch eher halbmondartige Kreisstrukturen entstehen (vgl. Abbildung 6.9). Daher werden auch Bäume mit etwas größerem BHD nicht entfernt. Somit garantiert die Formel 3.3.1 abhängig von der Pixelgröße, dass keine Cluster, welche Baumstämmen entsprechen, entfernt werden. Zugleich werden die Bilder bereinigt und die Fehleranfälligkeit der Hough-Transformation reduziert.

Als weiterer Vorbereitungsschritt für die Hough-Transformation wird eine Kantendetektion mit dem Canny-Edge-Detektor durchgeführt, welcher 1986 von John Canny vorgestellt wurde [Canny, 1986]. Er besitzt drei anpassbare Parameter, welche die Standardabweichung des Gauß-Filters und der untere und der obere Hystereseschwellwert sind. Die Standardabweichung des Gauß-Filters wird für den hier vorliegenden Anwendungsfall auf den Wert 2 gesetzt. Der Standardwert liegt bei 1, wobei gilt, dass je verrauschter das Bild ist, desto größer sollte die Standardabweichung gewählt werden [scikit-image, 2023a]. Da die Bilder aus Punktwolken generiert werden, besitzen sie im Normalfall einen gewissen Rauschanteil, weswegen der Wert höher als der Standardwert gesetzt wird. Für die Hystereseschwellwerte werden die Standardeinstellungen von 10% beziehungsweise 20% des Maximalwerts des vorherrschenden Datentypen beibehalten. Am geeignetsten wären adaptive Schwellwerte wie sie zum Beispiel in [Ojashwini et al., 2021] vorgestellt werden. Diese sind allerdings in diesem Fall zu komplex und die Standardeinstellungen genügen.

Nachdem alle Vorverarbeitungsmaßnahmen an den Binärbildern durchgeführt wurden, kann die Detektion der Baumstammkreise mit der zirkularen Hough-Transformation erfolgen. Diese wird in diesem Implementierungsfall durch sechs Parameter beeinflusst. Der erste Parameter definiert den Radienbereich, in welchem die aus der Hough-Transformation resultierenden Kreise liegen sollen. Er wird auf den Bereich von der Binärbild-Pixelgröße bis 1 m gesetzt. So hängt zwar die untere Grenze jeweils von der Pixelgröße der Binärbilder ab, was aber in diesem geringen Zentimeterbereich, in der sie sich normalerweise bewegt, keinen wesentlichen Unterschied macht.

Für die obere Grenze wird hier wieder die Annahme des maximalen Stammdurchmessers von Stadtbäumen von 1 m angesetzt [Rötzer et al., 2021]. Zwei weitere Parameter definieren die minimale Distanz zwischen den Kreiszentren in x- beziehungsweise y-Richtung. Da später zu nah aneinander stehende Bäume entfernt werden, wird der Wert hier auf 1 Pixel gesetzt. Ein Schwellwert-Parameter repräsentiert die minimale Intensität der Spitzen in jedem Houghraum und wird auf dem Standardwert von der Hälfte des Maximalwerts des entsprechenden Hough-Raums belassen [scikit-image, 2023b]. Am meisten Bedeutung für den Anwendungsfall hier hat die maximale Anzahl an Spitzen in jedem Houghraum *num\_peaks*. Sie beeinflusst entscheidend die Anzahl der detektierten Bäume sowie die Korrektheit und Vollständigkeit des Ergebnisses. Dies hat zur Folge, dass der Parameter je nach Punktwolke, Testgebiet und Anwendungsfall manuell gesetzt werden muss und kein Standardwert festgelegt werden kann. In Kapitel 5.3 wird im Zusammenhang mit der Ergebnisdarstellung der Anzahl der detektierten Bäume nochmal genauer darauf eingegangen. Weiterhin muss beachtet werden, dass Kreise mit größerem Radius höhere Spitzen im Houghraum ausbilden. Deshalb wird der Akkumulator mit dem Radiuswert normalisiert und die Kreise nach absteigendem Eintrag sortiert.

Alle Kreise, die im BHD-Binärbild von der Hough-Transformation gefunden werden, werden mit den detektierten Kreisen aus dem Stamm-Binärbild verglichen. Nur wenn die Kreise in beiden Binärbildern mit einer festgelegten Toleranz von der zirkularen Hough-Transformation erkannt werden, werden die Kreise aus dem BHD-Bild im weiteren Verlauf des Programms als mögliche Baumobjekte behandelt. Dafür wird eine Toleranz von 3 Pixeln gewählt, da die Mittelpunkte der Baumstammkreise sich durch die unterschiedliche Schichtdicke, aus der die Binärbilder generiert werden, leicht verschieben können. Durch die Toleranz wird sichergestellt, dass diese richtig detektierten Kreise im Ergebnis enthalten bleiben. Da manche Bäume trotzdem mehrfach erkannt werden oder falsche Kreisstrukturen als Bäume deklariert werden, werden später auf Grundlage der Baumparameter und nach festgelegten Kriterien noch weitere Baumobjekte aussortiert (vgl. Abschnitt 3.3.4).

Zusätzlich kann die Segmentierung der Bäume im BHD-Binärbild durch Vorwissen über die Baumpositionen gestützt werden. Dieses kann zum Beispiel aus einem schon bestehenden Baumkataster stammen. Hierzu werden die gefunden Kreismittelpunkte im BHD-Binärbild mit einer gewissen Toleranz mit den zur Verfügung stehenden Baumpositionen abgesichert. Dies kann zusätzlich oder anstelle der Validierung mit dem Stamm-Binärbild erfolgen. Wird nur das Vorwissen verwendet, können falsch detektierte Bäume ausgeschlossen werden. Andererseits können so auch keine neu gepflanzten Bäume ins Baumkataster aufgenommen werden. In der späteren Auswertung der Me-

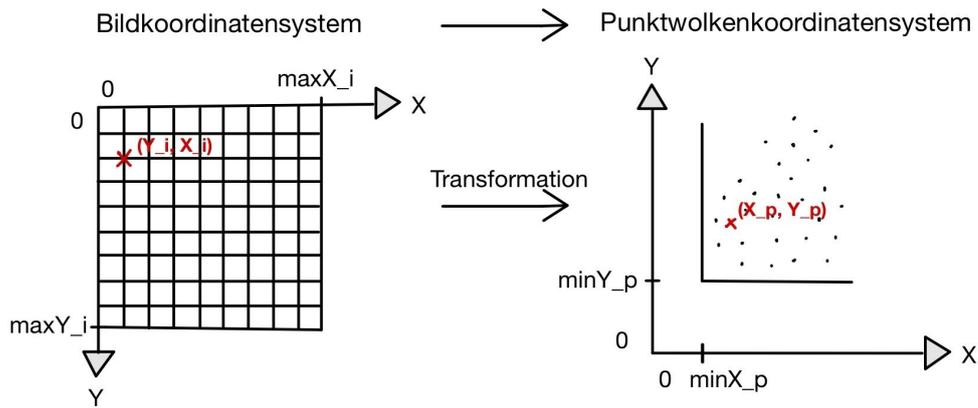


Abbildung 3.5: Veranschaulichung der Transformation vom Bildkoordinatensystem ins ursprüngliche Punktwolken-Koordinatensystem (Eigene Darstellung).

thodik wird kein Vorwissen eingesetzt, da es nicht für alle Testgebiete vorhanden ist (vgl. Kapitel 4) und eine komplette Neugenerierung eines Baumkatasters simuliert werden soll.

Aus den Kreisradien der als Bäume klassifizierte Kreise aus dem BHD-Bild, kann auf die Stammradien geschlossen werden. Durch die Multiplikation mit 2 können schließlich die Brusthöhen-durchmesser auf 1,3 m aller aus der Punktwolke detektierten Bäume erhalten werden. Die Kreis-mittelpunkte dagegen repräsentieren die Baumpositionen im Bildkoordinatensystem. Um die Lagekoordinaten ins ursprüngliche Koordinatensystem der Punktwolke zu überführen, ist eine Transformation notwendig, welche in Abbildung 3.5 verdeutlicht wird. Dabei muss beachtet werden, dass das Bildkoordinatensystem ein Linkssystem ist und der Ursprung sich in der linken oberen Ecke befindet, während das Koordinatensystem der Punktwolke im Normalfall ein Rechtssystem ist. Für die Transformation werden folgende Formeln verwendet:

$$x_p = \min(x_p) + pxlsize \cdot x_i \quad (3.3.2)$$

$$y_p = \min(y_p) + pxlsize \cdot (\max(y_i) - y_i) \quad (3.3.3)$$

Dabei sind  $x_p$  und  $y_p$  die Koordinaten im Punktwolken-Koordinatensystem in [m],  $x_i$  und  $y_i$  die Koordinaten im Bildkoordinatensystem in [pxl] und  $pxlsize$  die Pixelgröße in [m].

Sind die Lagekoordinaten im Punktwolkensystem bekannt, können im Bodenhöhengitter die entsprechenden z-Werte abgegriffen werden, um dreidimensionale Koordinaten zu erhalten. Nach

diesem Schritt liegen die endgültigen Positionen der Fußpunkte sowie die Brusthöhendurchmesser der Bäume aus der Punktwolke vor.

### 3.3.3 Baumhöhen und Baumkronendurchmesser

Für die Bestimmung der Baumhöhen und Baumkronendurchmesser wird das Grauwertbild verwendet, welches überwiegend die Baumkronen zeigt. Zunächst wird für jeden Baum einzeln die Baumkrone durch Region Growing im Grauwertbild ermittelt. Hierzu dienen die zuvor ermittelten Baumpositionen im Bildkoordinatensystem als Seed Points. Ausgehend von jeder Baumposition wird so die Ausdehnung der jeweiligen Baumkrone bestimmt und es entsteht eine binäre Baumkronenmaske pro Baum. Um zu verhindern, dass bei zusammenhängenden Baumkronen der Region Growing Algorithmus eine zu große Baumkrone ermittelt, wirken drei Parameter begrenzend. Dabei handelt es sich um einen Schwellwert für die Grauwerte und zwei Maximaldistanzen zur Initialposition. Die genauen Werte können in Tabelle 5.1 eingesehen werden und wurden von [Zintl, 2021] übernommen.

Um anschließend aus der binären Baumkronenmaske den Baumkronendurchmesser zu erhalten, wird in jeden Baumkronenbereich eine Ellipse geschätzt. Der Mittelwert von Haupt- und Nebenachse der Ellipse ergibt dann den Baumkronendurchmesser. Die Baumhöhe wird ebenfalls aus den ermittelten Baumkronenbereichen bestimmt. Dazu wird die binäre Baumkronenmaske über das Grauwertbild gelegt und das Pixel mit dem größten Grauwert bestimmt die Baumhöhe, da die Grauwerte nach den Höheninformationen der Punktwolke kodiert wurden. Nach [West, 2015] ist die Baumhöhe der höchste grüne Punkt des Baumes, sodass die Lage des höchsten Punktes innerhalb der Baumkrone keine Rolle spielt.

### 3.3.4 Verifikation der segmentierten Baumobjekte

Zur Verifikation der korrekten Segmentierung von Baumobjekten werden deren spezifische Parameter mittels festgelegter Kriterien geprüft, um ihre Einordnung als Baum sicherzustellen. Hierzu werden die Kriterien aus [Hurst & Geiger, 2020] angewendet. Demnach handelt es sich nicht um einen Baum, wenn Folgendes zutrifft:

- Die Baumhöhe, der BHD oder der mittlere Kronendurchmesser sind negativ.
- Der BHD ist größer als der mittlere Kronendurchmesser.
- Der BHD ist größer als die Baumhöhe.

- Die Baumhöhe ist kleiner als der mittlere Kronendurchmesser.

Das letzte Kriterium trifft nicht auf alle Baumarten zu. Beispielsweise bei Trauerweiden kann der mittlere Kronendurchmesser durchaus so groß sein wie die Baumhöhe. Da dies aber Einzelfälle sind und in diesem Fall typische urbane Baumarten untersucht werden, zu denen die Trauerweide nicht zählt, hilft dieses Kriterium fehlerhaft erkannte Bäume zu eliminieren.

Ein weiteres Kriterium zur Entfernung von Bäumen ist die räumliche Nähe zu anderen Baumobjekten. Konkret wird ein Baum entfernt, wenn die Distanz zwischen den Standorten der Bäume kleiner als die BHD ist. Ziel dieser Maßnahme ist es, duplizierte Bäume zu vermeiden. Dagegen mehrstämmige Bäume sollten dadurch im Ergebnis enthalten bleiben, da sie sich per Definition nach der Leistungsbeschreibung der Stadt München [Landeshauptstadt München, 2023] unterhalb von 1,3 m Höhe gabeln und somit die Stämme eine größere Distanz aufweisen.

### 3.3.5 Genauigkeitserwartung

Die Genauigkeit der extrahierten Baumparameter hängt von der Genauigkeit der Punktwolke, der Punktdichte, den gesetzten Programmparametern, sowie der gewählten Größe des Bodenrasters und der Bildpixel ab und kann nur für jeden Anwendungsfall einzeln abgeschätzt werden. Zudem hat die Grauwertkodierung im Wertebereich 0 bis 255 einen Einfluss auf die Baumhöhenermittlung. Darüber hinaus entstehen bei der Bestimmung des BHD Ungenauigkeiten bei schiefen Bäumen, da die Projizierung der Punkte in die x-y-Ebene nicht senkrecht zum Baumstamm passiert. Dadurch wird der Baumstamm schräg durchgeschnitten, was zu einer größeren BHD führt, als der Baum tatsächlich hat. Des Weiteren muss die Punktwolke den gesamten Baum vom Stammfuß bis zur Spitze umfassen und eine ausreichende Punktdichte aufweisen. Sind zum Beispiel nicht genügend Stammpunkte vorhanden, können mit der Hough-Transformation in unvorteilhaften Fällen auch keine eindeutigen Kreise in den Bildern detektiert werden. Andernfalls steigt das Risiko für falsch detektierte Kreise. Da der BHD auf der definierten Höhe von 1,3 m bestimmt wird, muss ein Baum zudem mindestens eine Stammlänge von 1,3 m aufweisen, um überhaupt Baumparameter mit der vorgestellten Methodik bestimmen zu können.

### 3.4 Alternativer Ansatz zur Bestimmung von Brusthöhendurchmessern

Im Folgenden wird ein alternativer Ansatz zur Bestimmung von Brusthöhendurchmessern aus Punktwolken aufgezeigt. Das entwickelte Programm ist modular aufgebaut, wodurch einzelne Teile leicht durch alternative Algorithmen ersetzt werden können. Dieser wurde aus zeitlichen Gründen allerdings nicht vollständig entwickelt und wird deshalb lediglich konzeptionell an dieser Stelle vorgestellt.

Der Ansatz basiert darauf die Baumstämme als Zylinder aus der Punktwolke zu segmentieren und mit Hilfe dieser Baumparameter zu bestimmen. Hierzu wird zunächst eine den Großteil der Baumstämme umfassende Schicht aus der Punktwolke entnommen. Diese ist vergleichbar zur Punktwolkenschicht, welche für das Stamm-Binärbild genutzt wurde. In diesem Fall wird zur Gewinnung der Schicht ein PassThrough-Filter genutzt. Idealerweise erscheinen Baumstämme in der ausgeschnittenen Punktwolke als Zylinder. Um diese Zylinder zu erhalten, müssen zunächst Normalen berechnet werden. Basierend auf diesen Normalen können mittels Region Growing Cluster in der Punktwolke ermittelt werden. Diese wiederum dienen als Eingangsinformationen für einen RANSAC mit Zylindermodell, um schlussendlich die Baumstämme als Zylinderobjekte zu erhalten. Aus dem Radius der Zylinder kann durch Multiplikation mit 2 auf die BHD der Bäume geschlossen werden. Dieses Verfahren könnte für die BHD-Bestimmung genauere Ergebnisse liefern wie der Bildverarbeitungsansatz, da die durch Streuung im Umkreis der Baumstämme liegenden Punkte das Ergebnis nicht so stark beeinflussen.

### 3.5 Konvertierung und semantische Darstellung in CityGML

Für spezielle Anwendungsszenarien im Zusammenhang mit einem semantischen 3D-Stadtmodell bietet es sich an, das Baumkataster beziehungsweise die gewonnenen Baummetriken in den CityGML-Standard (vgl. Kapitel 2.6) zu konvertieren. So können zum Beispiel Solarpotentialanalysen, Abschattungssimulationen oder Simulationen der Sichtfeldeinschränkung im Straßenverkehr [Hirt & Stilla, 2023] durchgeführt werden. Dazu muss aus den Baummetriken eine geeignete Baumgeometrie modelliert werden. Hierbei definiert das Geometriemodell von CityGML 1.0 beziehungsweise 2.0 (vgl. Abbildung 2.12), welche Geometrien zulässig sind. Durch zwei Restriktionen des zugrundeliegenden GML3-Geometriemodells aus dem ISO-19107-Standard sind nur ebene und keine gekrümmten Flächen zulässig (vgl. Kapitel 2.6.2) [OGC, 2016; Gröger & Plümer, 2012]. So müssen für einfache Baumdarstellungen zum Beispiel Kugeln, Zylinder oder Kegel durch



Abbildung 3.6: Detaillierte Modellierung eines Baums in CityGML. Die gesamte Geometrie ist aus planaren Polygonen zusammengesetzt. Darstellung wurde mit dem FME Data Inspector erstellt. Datensatz wurde vom Lehrstuhl für Geoinformatik der TUM bereitgestellt.

die Kombination von planaren Polygonen angenähert werden. Dadurch resultiert schon eine einfache Modellierung eines Baumes aus Zylinder und Kugel in eine komplexe Geometriemodellierung aus Flächen in CityGML. Mit steigender Detailanforderung an die Modellierung des tatsächlichen Baums steigt die Anzahl der Flächen und damit die Komplexität immer weiter an. Ein solches Beispiel zeigt Abbildung 3.6. Der Baum ist sehr detailliert aus einer Vielzahl an einzelnen Flächen modelliert, wozu über 200.000 Zeilen Code für die CityGML-Datei benötigt werden.

Das Geometriemodell von CityGML 1.0 und 2.0 ist somit suboptimal für die Modellierung von Bäumen. Im Konzeptmodell von CityGML 3.0 sind theoretisch alle Geometrien aus dem ISO-19107-Standard zulässig [OGC, 2021b]. Im UML-Diagramm der Geometrie dagegen wird wiederum nur eine Teilmenge der Geometrien definiert [OGC, 2021b], was sich widerspricht. Darüber hinaus wurde für die praktische Umsetzung in GML noch kein Kodierungsstandard veröffentlicht [OGC, 2023b], sodass eine Umsetzung in CityGML 3.0 im Rahmen dieser Masterarbeit noch nicht praktikabel ist. Auch mit CityGML 1.0 und 2.0 ist aufgrund der Komplexität, die schon einfache Baumdarstellungen erreichen, keine direkte Erstellung aus Python umsetzbar. Um trotzdem einen automatischen Programmablauf von der Punktwolke bis zum CityGML-Modell zu erzielen, wurde auf einen FME-Workflow ausgewichen, welcher sich aus Python aufrufen lässt. FME ist eine Anwendung im räumlichen Kontext, welche das Extrahieren, Transformieren und Laden von Daten in automatisierten Workflows erlaubt [Safe Software Inc, 2023]. Sie wird von Safe Software Inc. entwickelt und ist lizenzpflichtig [Safe Software Inc, 2023].

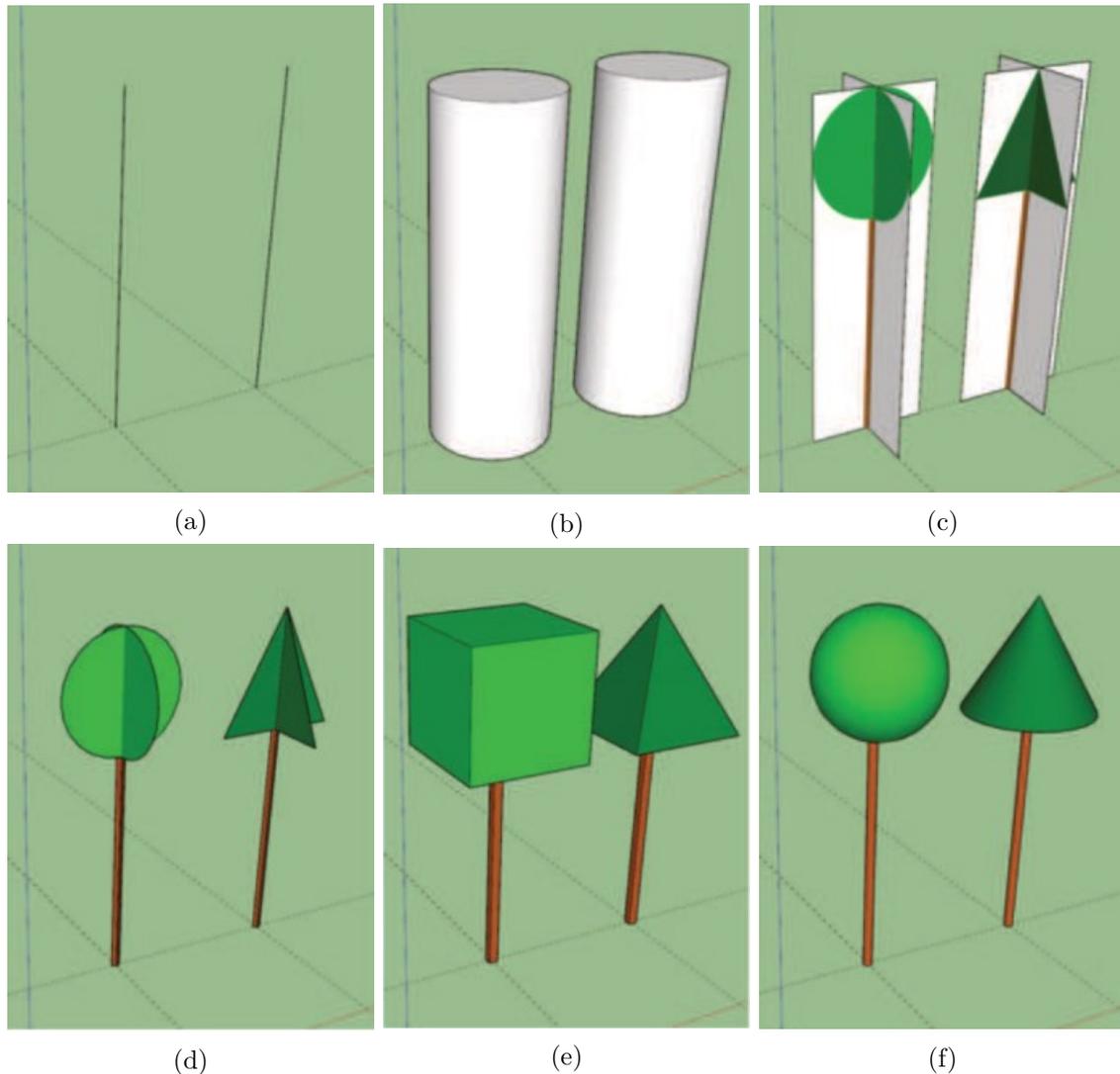


Abbildung 3.7: Baummodelle verschiedener Komplexität mit dem CityGML Geometriemodell [Hurst & Geiger, 2020]. a Linien. b Zylinder. c Texturierte Rechtecke. d Kontur beschreibende Polygone. e Quader als Stamm und Quader beziehungsweise Pyramide als Baumkrone. f Zylinder als Stamm und Kugel beziehungsweise Kegel als Baumkrone.

Hurst & Geiger [2020] lösen dieses Problem, indem der Anwender über die Graphical User Interface (GUI) die Baumattribute des programminternen Datenmodells manuell den Attributen der *SolitaryVegetationObject*-Klasse zuweisen muss. Für die geometrische Darstellung stehen den Nutzern sechs verschiedene Baumgeometriemodelle zur Auswahl, welche in Abbildung 3.7 dargestellt sind. Die detaillierten Beschreibungen der Baummodelle kann in [Hurst & Geiger, 2020] nachvollzogen werden. Sie sollen nach dem aufgestellten Konzept von Hurst & Geiger [2020] aus den Baumparametern berechnet werden und der Nutzer kann dann das gewünschte Baummodell manuell den verschiedenen LoD-Stufen zuweisen. Zum Erscheinungszeitpunkt der Publikation war es den Autoren allerdings noch nicht möglich, die geometrischen Baummodelle in CityGML zu generieren und zu exportieren. Lediglich der parametrisierte Export der Baummetriken in ei-

ne *SolitaryVegetationObject*-Klasse wurde praktisch umgesetzt. Da die entscheidenden Teile der Umsetzung fehlen, kann auf den von ihnen für diese Arbeit bereitgestellten Code nicht aufgebaut werden. Um der Anforderung des automatisierten Programmablaufs gerecht zu werden, kommt eine manuelle Zuordnung durch den Nutzer für die hier vorgestellte Methodik nicht infrage. Hier soll der zuvor erwähnte FME-Workflow die manuellen Schritte des Nutzers übernehmen und das Problem der komplexen Modellierung lösen. Dies hat den Nachteil, dass dadurch das Programm von einer lizenzpflichtigen Software abhängig ist.

Der FME-Workflow ist in Abbildung 3.8 dargestellt und wurde mit FME Workbench 2022.2.5 entwickelt. Er erstellt aus Baumparametern die zugehörigen *SolitaryVegetationObjects* im CityGML-Format. Dazu werden zunächst die Baumparameter in Form einer csv-Datei eingelesen und einzeln als Attribute bereitgestellt (vgl. Abbildung 3.8 blauer Kasten). Zusätzlich wird für jedes eingehende Feature eine Universally Unique Identifier (UUID) erzeugt und als Attribut hinzugefügt (vgl. Abbildung 3.8 lila Kasten). Nach diesem Schritt liegen alle nötigen Attribute vor, um ein *SolitaryVegetationObject* mit 3D-Geometrie zu modellieren. Die Geometrie soll aus einem Zylinder als Stamm und einer Kugel als Krone bestehen (vgl. Abbildung 3.7f) und passend zu den gegebenen Baumparametern skaliert werden. Um dies zu erreichen werden mit Hilfe der Baumfußkoordinaten, der Baumhöhe und des mittleren Kronendurchmessers drei Punkte erstellt (vgl. Abbildung 3.8 türkiser Kasten). Der erste Punkt repräsentiert den Baumfußpunkt und damit den Zylinderbasispunkt der Geometrie. Dementsprechend wird ein zweiter Punkt als Zylinderoberkante senkrecht über dem ersten Punkt gesetzt. Die Höhe berechnet sich aus der Differenz der Baumhöhe und des mittleren Kronendurchmessers. Der letzte Punkt soll zur Generierung der Kugel als Baumkrone dienen und stellt daher den Kugelmittelpunkt dar. Er befindet sich ebenfalls senkrecht über dem Baumfußpunkt, wohingegen sich die Höhe aus der Differenz der Baumhöhe und des halben mittleren Kronendurchmessers ergibt. Im nächsten Schritt (vgl. Abbildung 3.8 orangene Kästen) werden die beiden Zylinderpunkten mit einer Linie verbunden, woraus anschließend ein Zylinder durch Buffering mit der halben BHD als Radius generiert werden kann. Analog dazu wird aus dem Kronenpunkt eine Kugel mit dem halben Kronendurchmesser als Radius modelliert. So erhält jeder gegebene Baum abhängig von seinen Maßen eine 3D-Geometrie. Abschließend müssen Kugel und Zylinder zu einer Geometrie kombiniert werden und CityGML spezifische Attribute gesetzt werden (vgl. Abbildung 3.8 grüner Kasten), um dann eine CityGML-Datei auszugeben (vgl. Abbildung 3.8 blauer Kasten). In dieser Datei liegen alle Bäume aus der gegebenen csv-Datei mit ihren Parametern und 3D-Geometrien als *SolitaryVegetationObjects* vor. Die Datei kann unter anderem mit dem FME Data Inspector visualisiert und weiter verarbeitet werden. Beispiele für solche Visualisierungen zeigt die Abbildung 5.14.

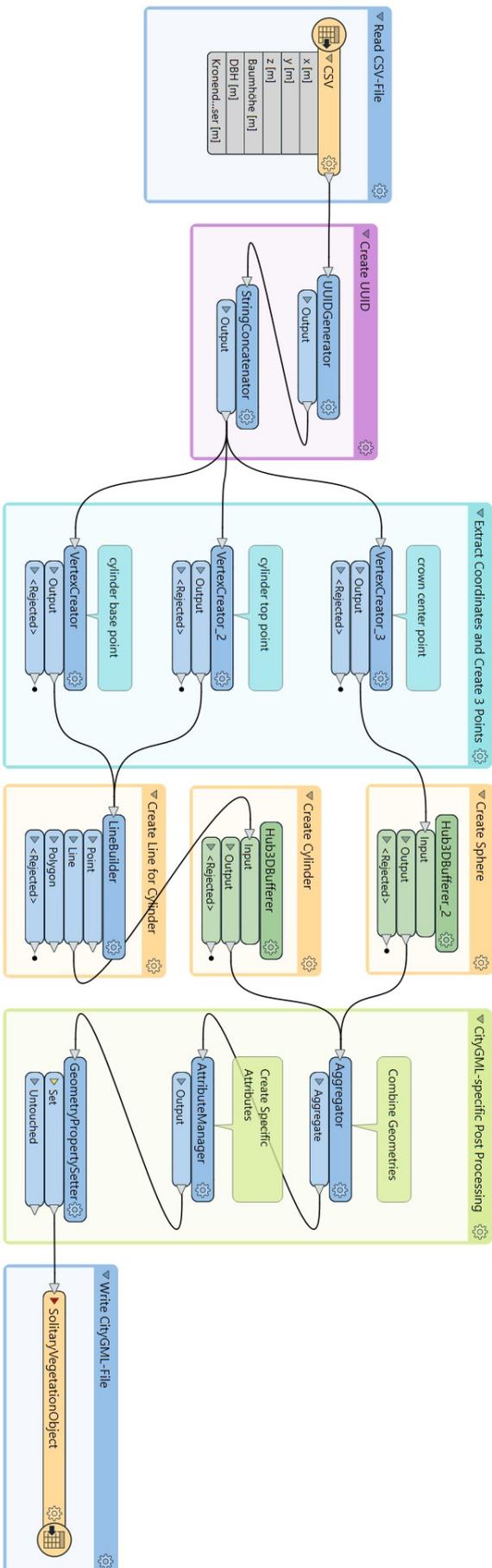


Abbildung 3.8: FME-Workflow, welcher aus einer csv-Datei mit Baumparametern *SolitaryVegetationObjects* im CityGML-Format erstellt (Screenshot aus FME Workbench 2022.2.5).



---

## 4 Untersuchungsgebiete, Datenaufnahme und verwendete Datensätze

---

Im Folgenden werden die beiden Untersuchungsgebiete Arcisstraße und Pasinger Klostergarten in München vorgestellt. Zudem wird auf die Datenaufnahme speziell in den beiden Gebieten eingegangen und die daraus resultierenden Datensätze beschrieben. Diese stellen dann die Testdatensätze für die in Kapitel 3 entwickelte Methodik dar, welche in den folgenden Kapiteln auf Grundlage dieser ausgewertet wird. Zudem werden die 3D-Gebäudemodelle des bayerischen Vermessungsamts vorgestellt, welche als einfache semantische 3D-Stadtmodelle zur Einbettung der erzeugten Baummodelle dienen.

### 4.1 Arcisstraße in München

Die Arcisstraße befindet sich im Stadtviertel Maxvorstadt im Zentrum der bayerischen Landeshauptstadt München. Sie verläuft in Nord-Süd-Richtung vom Elisabethplatz zum Königsplatz. Die Straße ist etwa 1,3 km lang und führt unter anderem am Haupteingang der Technischen Universität München (TUM) vorbei. Der 250 m lange Straßenbereich vor dem Haupteingang der TUM stellt das Untersuchungsgebiet für die urbane Umgebung „Straßenzug“ mit Bäumen dar. Das Untersuchungsgebiet wurde dabei in einen Nord- und Südteil aufgeteilt. Abbildung 4.1 zeigt die beiden Untersuchungsgebiete „Arcisstraße Nord“ und „Arcisstraße Süd“ in rot. Die nächsten zwei Kapitel behandeln die Datenaufnahme und die daraus resultierenden Datensätze in der Arcisstraße.

#### 4.1.1 Datenaufnahme und Datensätze mittels Mobile Laser Scanning

Als MLS-Datensatz für die Untersuchungsgebiete „Arcisstraße Nord“ und „Arcisstraße Süd“ wird ein Teil des TUM-MLS-2 Datensatzes vom 19.12.2018 verwendet. Neben dem TUM-MLS-2 Da-

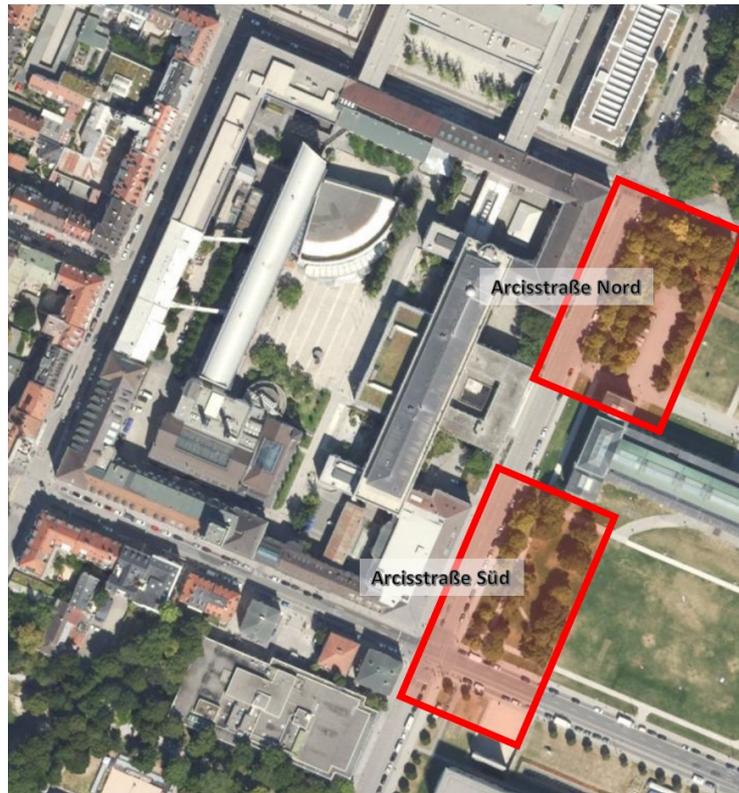


Abbildung 4.1: Untersuchungsgebiete Arcisstraße Nord und Süd an der TUM (eigene Darstellung). Hintergrund: Luftbild aus dem BayernAtlas [Bayerische Vermessungsverwaltung, 2023a].

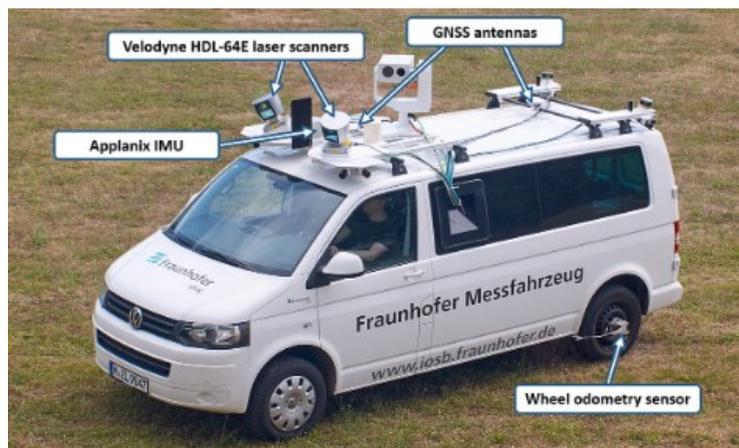
tensatz existiert der TUM-MLS-1 Datensatz, welcher zwei Jahre früher unter ähnlichen Bedingungen aufgenommen wurde. Beides sind kooperative Benchmark-Datensätze der Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München (TUM-PF) und des Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (Fraunhofer IOSB) aus Ettlingen. Die originalen Datensätze unterliegen dem Copyright des Fraunhofer IOSB und werden unter der Creative Commons Attribution-Non Commercial-Share Alike 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0) Lizenz zur Verfügung gestellt. Als Testgebiet fungiert das Stammgelände der TUM mit den umliegenden Straßenzügen in der Innenstadt von München. Das circa 29.000 m<sup>2</sup> große Testgebiet zeigen die Abbildungen 4.3a und b einmal als Luftbild und einmal die aggregierte MLS Punktwolke von 2018. [TUM-PF, 2018]

Die beiden Datensätze TUM-MLS-1 und -2 wurden beide mittels MLS unter Verwendung des Multi-Sensor-Fahrzeuges MODISSA erzeugt [Zhu et al., 2020]. MODISSA steht dabei für Mobile Distributed Situation Awareness. Die Multi-Sensor-Plattform des Vans bestand für die Aufnahme der Datensätze unter anderem aus zwei Velodyne HDL-64E Laserscannern, welche mit einer Drehfrequenz von 10 Hz etwa 130.000 3D-Punkte pro Umdrehung mit Distanzen bis 120 m aufnahmen [Zhu et al., 2020]. Das Aufnahmeprinzip mit den beiden schräg montierten Laserscannern illus-

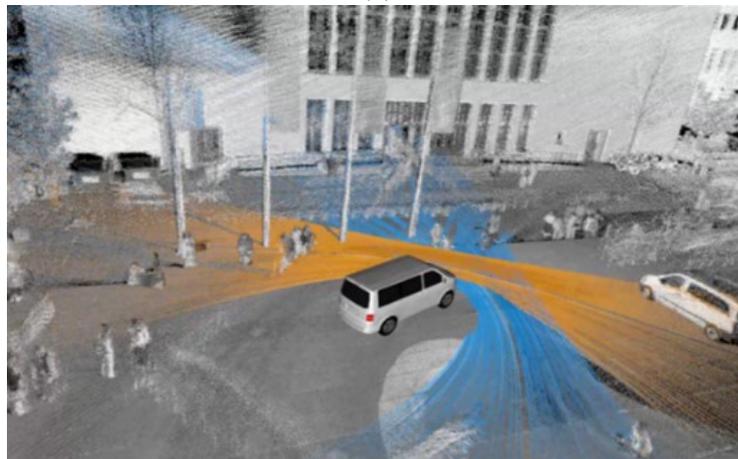
triert Abbildung 4.2b. Durch ein Applanix POS LV Inertial Navigation System (INS) mit Real-Time-Kinematik (RTK)-Korrekturdaten des Satellitenpositionierungsdienst (SAPOS)-Netzwerks war eine direkte Georeferenzierung der Punktwolken in ein lokales Referenzsystem möglich [Zhu et al., 2020]. Den kompletten Aufbau des Fahrzeuges zeigt Abbildung 4.2a. Weitere Details zu den Aufnahmebedingungen, Sensoren und den entstandenen Datensätzen werden in Zhu et al. [2020] beschrieben.

Der TUM-MLS-2 Datensatz besteht aus über 2 Milliarden 3D-Punkten in 21.170 Point Cloud Data (pcd)-Dateien, welche circa 73 Gigabyte (GB) Speicher benötigen [TUM-PF, 2018]. Für die Auswertung der entwickelten Methodik wird vom Gesamtdatensatz lediglich ein kleiner Teil verwendet, der die Arcisstraße Süd und Nord umfasst, da dort die meisten Bäume wachsen. Abbildung 4.3a zeigt die Arcisstraße im gelb markierten Bereich und Abbildung 4.1 zeigt in rot die beiden verwendeten Datensätze „Arcisstraße Nord“ und „Arcisstraße Süd“. Dabei wurden die beiden Dateien jeweils aus mehreren der Dateien des TUM-MLS-2 Datensatzes in Laser (las)-Dateien zusammengefügt und georeferenziert. Die Süd-Datei hat über 8 Millionen 3D-Punkte und ist etwa 266 Megabyte (MB) groß (vgl. Abbildung 4.4b). Die Nord-Datei dagegen, hat über 23 Millionen Punkte und umfasst 769 MB (vgl. Abbildung 4.4a). Abbildung 4.4 veranschaulicht die beiden Punktwolken eingefärbt in Bezug auf die Intensitätswerte.

Bevor die Datensätze von der TUM-PF für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurden, wurden die Punktwolken bereits vorverarbeitet. Dazu wurden alle Punkte mit sehr hohen und sehr niedrigen Intensitätswerten herausgefiltert. Außerdem wurden alle Punkte, die sich näher als 5 mm an einem anderen Punkt befinden entfernt, um duplizierte Punkte zu vermeiden. Zuletzt wurde die Punktwolke mit einem leichten SOR-Filter gefiltert, um Ausreißer und Rauschen zu minimieren. Hierbei wurde der Abstand zu den zehn nächsten Nachbarn mit dem globalen mittleren Abstand verglichen und der Punkt entfernt, wenn er außerhalb des Intervalls der 3-fachen Standardabweichung lag. Neben den genannten Vorteilen dienen alle Maßnahmen unter anderem dazu, die Dateigrößen zu verkleinern. [Hirt et al., 2021b]

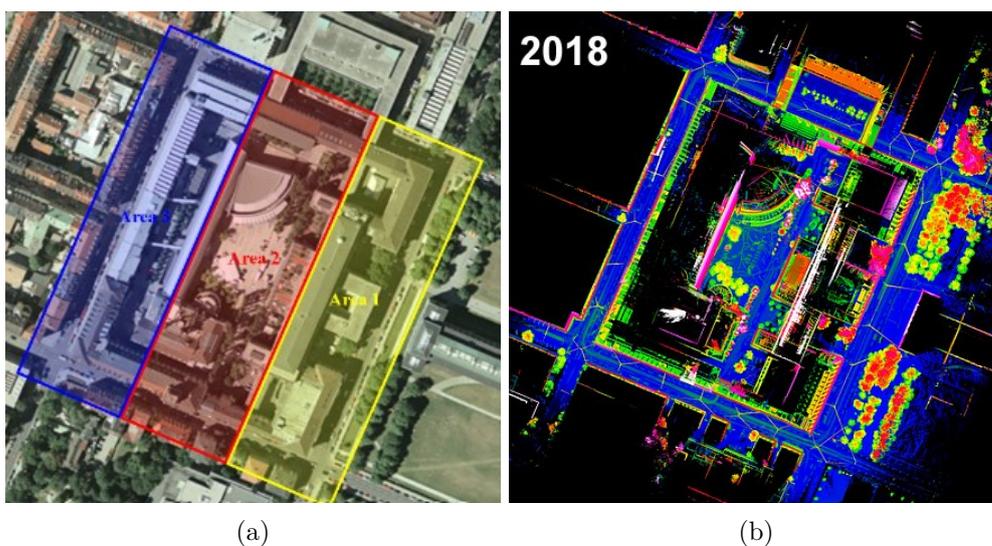


(a)



(b)

Abbildung 4.2: MLS-Plattform MODISSA. a Fraunhofer Messfahrzeug mit Multi-Sensor-Plattform [Zhu et al., 2020]. b Illustration der Datenaufnahme [Zhu et al., 2020].



(a)

(b)

Abbildung 4.3: Das Stammgelände der TUM als Testgebiet. a Luftbild des Campus der TUM [Zhu et al., 2020], wobei der gelb markierte Bereich für diese Arbeit genutzt wird. b Aggregierte Punktwolke der Messfahrt 2018, eingefärbt in Bezug auf die Höhe [Zhu et al., 2020].

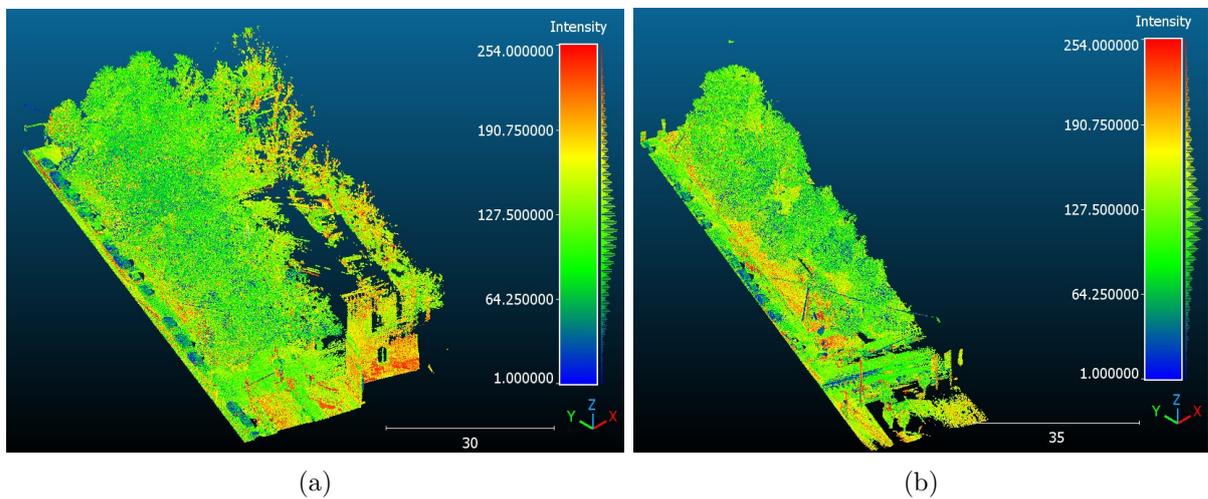


Abbildung 4.4: Verwendete Punktwolken eingefärbt in Bezug auf die Intensitätswerte zu Visualisierungszwecken (eigene Darstellungen). a Punktwolke der Arcisstraße-Nord. b Punktwolke der Arcisstraße-Süd.

### 4.1.2 Referenzdaten durch herkömmliche Dendrometrie

Die Referenzdaten für das Untersuchungsgebiet Arcisstraße wurden mit herkömmlichen Dendrometrie-Methoden (vgl. Kapitel 2.3) im März 2021 und ein weiteres Mal im März 2023 ermittelt. Die Messergebnisse sowie Übersichten von beiden Kampagnen befinden sich in Anhang E.

Die Messungen im Jahr 2023 wurden im Rahmen der Masterarbeit am 16.03. und 31.03. von zwei Personen durchgeführt. Die Nummerierung der Bäume kann in Abbildung E.2 nachvollzogen werden. Hierbei wurde die Reihenpflanzung der Bäume als Grundlage verwendet. Die erste Baumreihe im Nordteil direkt an der Arcisstraße trägt von Norden nach Süden Nummern im 100-Bereich. Die zweite und dritte Baumreihe respektive Nummern im 200- beziehungsweise 300-Bereich. Im Süden beginnt die Baumreihennummerierung bei 601. Alle Bäume außerhalb des Süd- und Nordteils tragen 900-Nummern.

Zur späteren Berechnung der BHD nach der Formel

$$d = U/\pi \tag{4.1.1}$$

mit  $d$  = Durchmesser [m] und  $U$  = Umfang [m] wurden die Umfänge aller Bäume mit dem Maßband auf 1,3 m Höhe ermittelt. Die Abbildungen 2.5 und 4.5a zeigen das Vorgehen exemplarisch für einen Baum im Messgebiet. Der abgebildete Lotstab des Prismas diente dabei als Referenz für die Höhe 1,3 m.

Zur Bestimmung der Baumpositionen wurden mehrere Vorgehen diskutiert: Erstens könnte das Prisma jeweils vor den Baum gehalten werden, um dann unter Berücksichtigung des Prismengehäuses und des Baumradius auf dessen Position zu schließen. Bei dieser Methodik wären auch Reflexmarken direkt am Stamm denkbar. Bei der zweiten Methodik wird das Prisma jeweils rechts und links vom Baumstamm angehalten und so immer zwei Punkte pro Baum aufgenommen. Durch Mittelung der beiden Prismenpositionen kann dann wiederum auf die Baumposition geschlossen werden. In diesem Fall wurde das zweite Vorgehen gewählt (vgl. Abbildung 4.5b), da bei einer Messung auf 1,3 m auch gleich der BHD kontrolliert werden kann. Darüber hinaus ist dieses Vorgehen weniger fehleranfällig, da es nicht von der BHD-Messung und dabei entstandenen Fehlern abhängig ist.

Für die Messung der Baumhöhe wurde die Definition nach [West, 2015] angewendet, dass die Höhe des Baums sich durch seinen höchsten grünen Punkt bestimmt (vgl. Kapitel 2.3.2). Dazu wurde erst dieser Punkt eines Baumes identifiziert, angepeilt und abschließend die Winkel gemessen. Abbildung 4.5c zeigt exemplarisch eine solche Anpeilung. Zusammen mit der zuvor

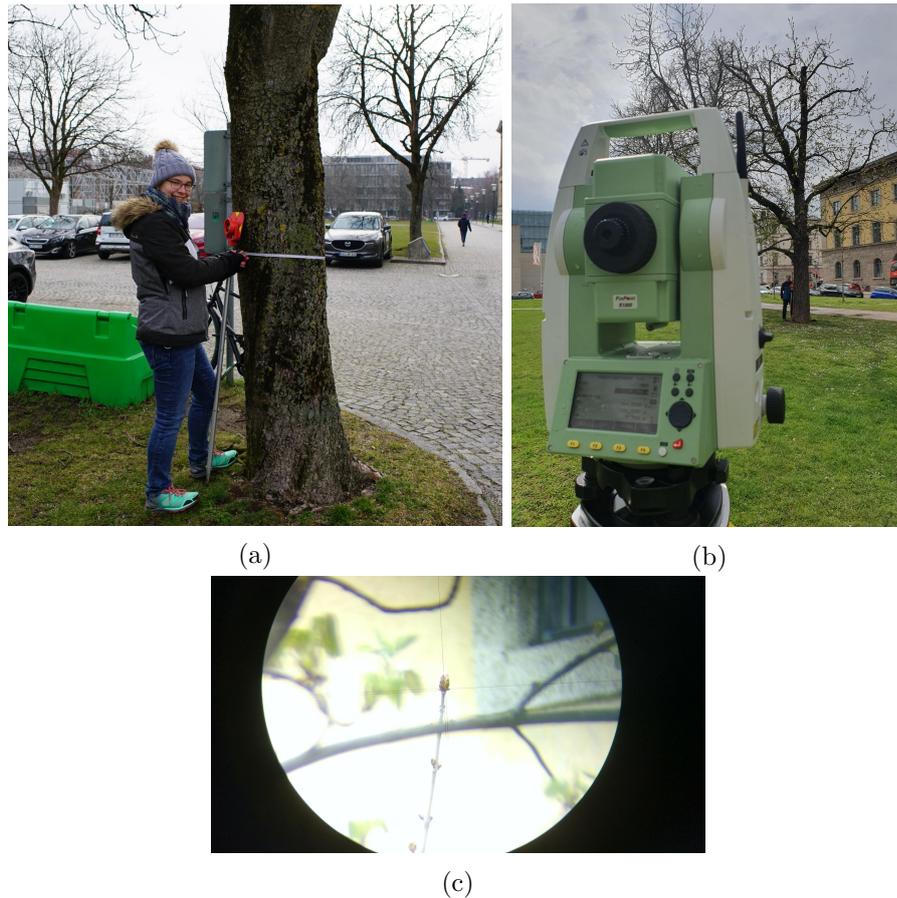


Abbildung 4.5: Messungen im Testgebiet Arcisstraße im März 2023. a Messung der Baumumfänge zur Ermittlung der BHD (Aufnahme von PR Hirt). b Messung der Baumpositionen (eigene Aufnahme). c Sicht durch die Optik des Tachymeters zur Messung der Baumhöhe (Aufnahme von PR Hirt).

gemessenen Baumposition beziehungsweise der Horizontalstrecke plus der Tachymeterhöhe ist es dann möglich, auf die Baumhöhe zu schließen.

Die Datenaufnahme 2021 wird von der TUM-PF bereitgestellt und fand am 24.03. statt. Die Messungen wurden damals von lediglich einer Person durchgeführt, weshalb die verwendeten Methoden von jenen 2023 abweichen. Die Umfänge der dünneren Bäume wurden ebenfalls mit dem Maßband zur BHD-Bestimmung ermittelt. Bei dickeren Bäumen dagegen wurden mit einem Meterstab zwei orthogonale Durchmesser gemessen und diese dann gemittelt. Dadurch sind Genauigkeitsunterschiede in den BHD-Werten zu erwarten. Die Positionen der Bäume wurden nicht tachymetrisch, sondern manuell in den lokalen MLS-Punktwolken (vgl. Kapitel 4.1.1) bestimmt und anschließend georeferenziert. Dabei wurden Punkte an den Außenkanten der Baumstämme verwendet, wodurch die Genauigkeit dieser Positionsbestimmungen im Vergleich zu den Tachymetermessungen 2023 um bis zu einem halben Meter abweichen kann. Hingegen die Höhen wurden 2021 ebenfalls tachymetrisch bestimmt. Hierzu wurde die Distanz vom Tachymeterstandpunkt

zum Stamm reflektorlos bestimmt und anschließend der Zenitwinkel zur Baumspitze gemessen. Unter Annahme eines ebenen Geländes konnte mit Hilfe der Instrumentenhöhe dann trigonometrisch auf die Baumhöhe geschlossen werden. Aufgrund der großen Unterschiede bei der Datenaufnahme können die Daten aus den Jahren 2021 und 2023 nur unter Berücksichtigung dieser verwendet werden. [PR Hirt, Persönliche Kommunikation, 13. April 2023 und 04. Juni 2023]

## 4.2 Pasinger Klostergarten

Der Pasinger Klostergarten ist ein historischer Garten im Münchner Stadtteil Pasing, welcher bis 2021 der Congregatio Jesu gehört hat. Da die Schwesternschaft den Park jedoch nicht mehr unterhalten kann, wurde er 2021 an den BUND Naturschutz in Bayern e.V. veräußert. Dieser möchte den Fortbestand des Parks sicherstellen und ihn zum Teil der Öffentlichkeit zugänglich machen. Zukünftig soll er als Ort für Umweltbildung und Naturschutz dienen und den Besuchern die Möglichkeit geben, die Schönheit und Vielfalt der Natur in der Stadt zu erleben. [BUND, 2021]

Abbildung 4.6 zeigt das Gebiet des Klostergartens in rot. Das Areal teilt sich in eine Streuobstwiese, einen Gemüsegarten und ein Waldgebiet auf, wobei das Waldgebiet zum Teil auf einer Insel liegt [BUND, 2021]. Weitere Eindrücke der einzelnen Gebiete des Klostergartens und Bilder von der Messkampagne mit der TUM-PF befinden sich in Anhang F. Den Transformationsprozess des bisher von der Öffentlichkeit abgeschotteten Parks hin zu einem teilweise öffentlich zugänglichen Parks begleiten die TUM-PF und die Hochschule München messtechnisch [TUM-PF, 2022].

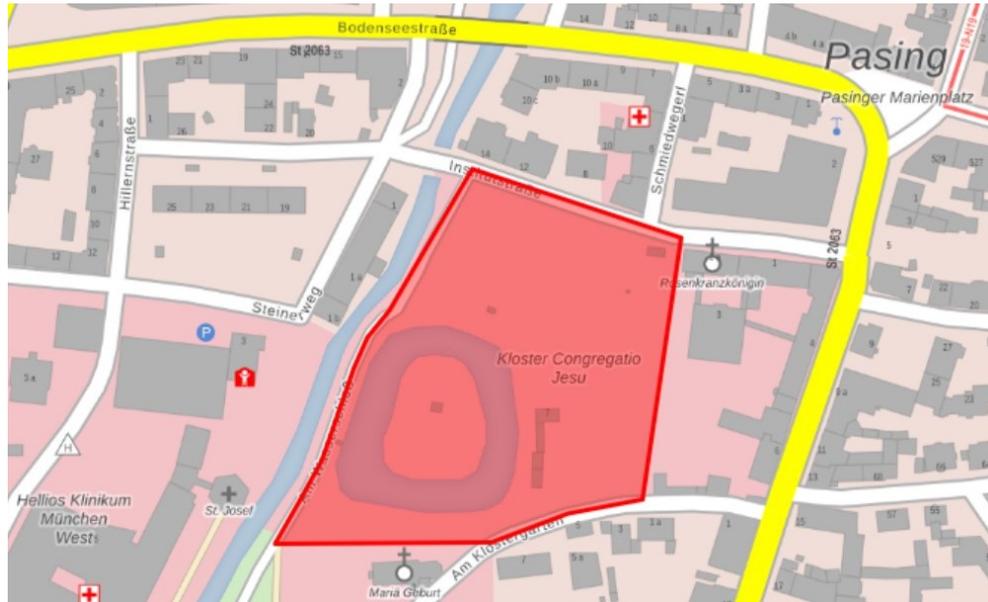


Abbildung 4.6: Untersuchungsgebiet Pasinger Klostergarten (eigene Darstellung). Hintergrund: Karte aus dem BayernAtlas [Bayerische Vermessungsverwaltung, 2023a].

Die Datenaufnahme im Pasinger Klostergarten fand im Oktober 2022 mit einem personengetragenen MLS System statt. Die verschiedenen Sensoren befanden sich dabei auf einem selbstgebauten Rucksacksystem der Technischen Universität Darmstadt, welches in Abbildung 4.7 dargestellt ist. Die Spezifikationen des Rucksacksystems werden in [Goebel et al., 2023] näher erläutert und im Folgenden kurz zusammengefasst: Zu den Sensoren zählen zwei Velodyne VLP16 Puck Lite, die in einem Winkel von  $45^\circ$  und  $90^\circ$  angebracht sind. Des Weiteren sind eine 10-Band Multispektral-Kamera, eine Inertial Measurement Unit (IMU) und eine GNSS-Antenne in das Multisensorsystem integriert. Zur Stromversorgung dient eine LiPo4 Autobatterie und zur Steuerung wird ein Laptop mit Linux Ubuntu 20.04 Betriebssystem, auf welchem die Robotic Operating System (ROS) Version noetic läuft, verwendet. Für die Interaktion mit den Sensoren dienen die offiziellen ROS-Pakete von Xsense und Velodyne. Für die Kommunikation zwischen den Sensoren wurde dagegen eine eigene Lösung von Goebel et al. [2023] programmiert. Im Hintergrund läuft ein Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-Algorithmus zur Registrierung der Aufnahmen.

Während der Messkampagne wurden vier Bereiche des Pasinger Klostergartens aufgenommen: Einmal die Würminsel, dann ein Kreis um den See der Würminsel, der Gemüsegarten und die Streuobstwiese. Für die Auswertung in den folgenden Kapiteln werden lediglich die Daten der Streuobstwiese verwendet, da sie am ehesten einem kultivierten Stadtpark entspricht. Die Punktwolke ist in Abbildung 4.8 dargestellt und hat neben der Georeferenzierung anhand von ALS-Daten keine Vorverarbeitung durchlaufen [M Goebel, Persönliche Kommunikation, 06. März 2023]. Sie besteht aus 28.948.031 Punkten und die las-Datei ist 790 MB groß.

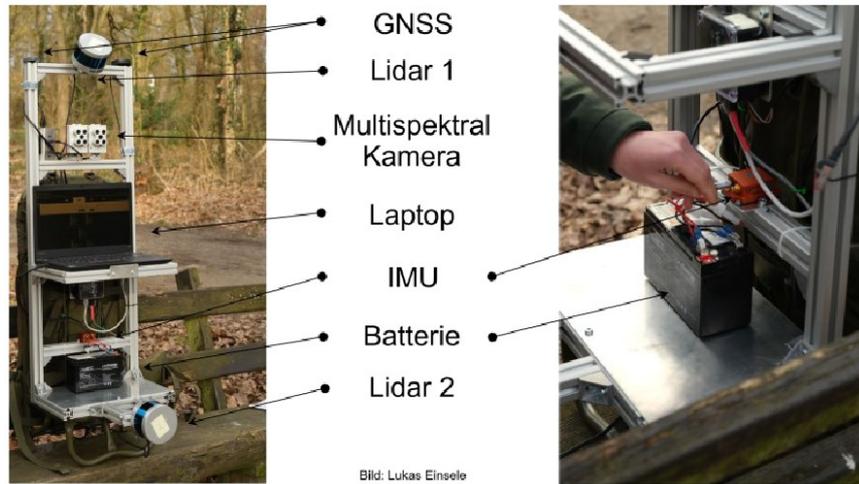


Abbildung 4.7: Komponenten des personengetragenen Mobile Laserscanning Systems [Goebel et al., 2023].

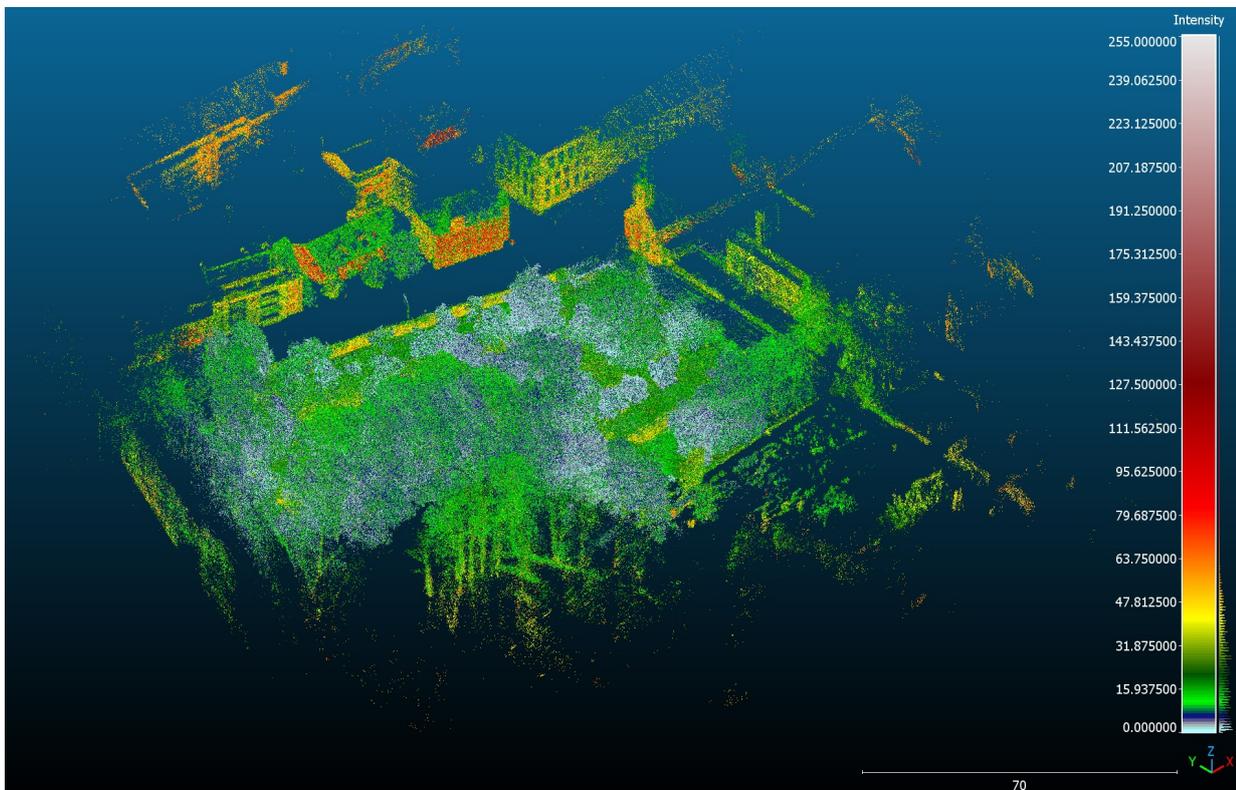


Abbildung 4.8: Verwendete Punktwolke des Pasinger Klostersgartens eingefärbt in Bezug auf die Intensitätswerte zu Visualisierungszwecken (eigene Darstellung).

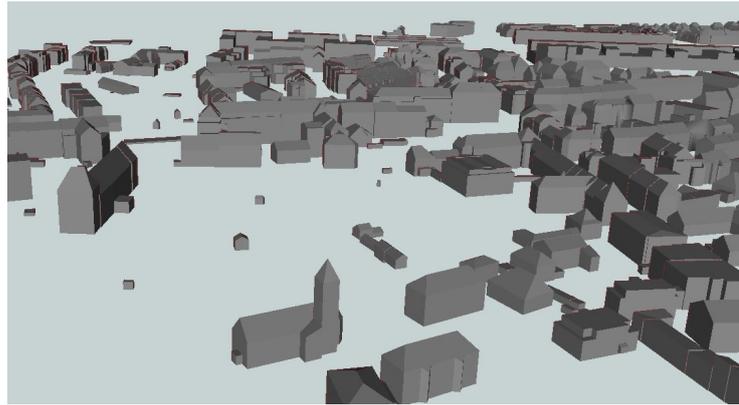


Abbildung 4.9: 3D-Stadtmodell bestehend aus LoD2-Gebäudemodellen von Pasing rund um den Klostergarten. Daten von der Bayerischen Vermessungsverwaltung [Bayerische Vermessungsverwaltung, 2023c].

### 4.3 Semantisches 3D-Gebäudemodell der bayerischen Vermessungsverwaltung

Die Bayerische Vermessungsverwaltung stellt 3D-Gebäudemodelle für ganz Bayern kostenfrei auf ihrer Webseite zur Verfügung [Bayerische Vermessungsverwaltung, 2023c]. Der landesweite Datensatz besteht aus etwa 9,8 Millionen Gebäudeobjekten im CityGML-Standard 1.0 und entspricht den Vorgaben der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). Die semantischen Gebäudemodelle werden stetig aktualisiert und ihre Geometrie entspricht LoD2 mit konformen Standarddachformen aus dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS). Hierfür dienen ALS-Daten, Gebäudeeinmessungen, Gebäudegrundrisse aus dem ALKIS und ein luftbildbasiertes DGM als Modellierungsgrundlage. Dabei entspricht die Lagegenauigkeit der Gebäude den zugrundeliegenden Grundrissen aus ALKIS und die Höhengenaugigkeit beträgt im Normalfall 20-30 cm. [Bayerische Vermessungsverwaltung, 2023b]

Die 3D-Gebäudeobjekte können als 2 km x 2 km große Kacheln unter Beachtung der CC-BY-4.0-Lizenz heruntergeladen werden [Bayerische Vermessungsverwaltung, 2023c]. Für die Darstellung der Baumobjekte aus dem automatisierten Workflow im Zusammenhang mit einem 3D-Stadtmodell werden drei Kacheln aus diesem Datensatz verwendet: Zwei Kacheln zeigen das Gebiet rund um die TUM, während die dritte Kachel unter anderem den Bereich des Pasinger Klostergartens umfasst (Abbildung 4.9).



---

## 5 Ergebnisse

---

Im Folgenden wird die in Kapitel 3 entwickelte Methodik und Implementierung angewendet und die Ergebnisse aus den verschiedenen Programmteilen vorgestellt. Als Datengrundlage dienen die in Kapitel 4 beschriebenen Datensätze, womit die zwei unterschiedlichen urbanen Gebiete Straßenzug und Park untersucht werden. Darüber hinaus wird die Laufzeit des Verfahrens betrachtet und dargelegt, inwieweit ein Vergleich zur zugrundeliegenden Bachelorarbeit möglich ist. Außerdem werden die beiden urbanen Gebiete Straßenzug und Park vergleichend betrachtet. Abschließend wird anhand der Arcisstraße das hier vorgeschlagene Vorgehen mit der manuellen Erstellung eines Baumkatasters hinsichtlich Arbeits-, Personal- und Zeitaufwand sowie Kosten verglichen.

Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse hängen maßgeblich davon ab, wie die Parameter bei der Implementierung gesetzt werden. Daher wurde darauf geachtet diese möglichst nach logischen Gesichtspunkten zu wählen, welche in den jeweiligen Kapiteln der Methodik (Kapitel 3) dargelegt werden. Dies dient vor allem dem Ziel, die Implementierung automatisiert für unterschiedliche Datensätze aus unterschiedlichen Gebieten ohne Nutzereinwirkung anwenden zu können. Die folgende Tabelle 5.1 stellt die Parameter des Bildverarbeitungsansatzes zur Extraktion von Baumparametern (vgl. Kapitel 3.3) übersichtlich zusammen. Die Parameter der anderen Programmteile können in den entsprechenden Kapiteln nachvollzogen werden.

Für die Pixelgröße der Binärbilder ist eine logische Wahl des Werts nur in Abhängigkeit des Datensatzes möglich. Für die Arcisstraße Süd und Nord wurden 2,5 cm gewählt, da die Punktwolken vergleichsweise klein sind und eine geringere Ausdehnung in der horizontalen Ebene haben als der Pasinger Klostergarten. Zudem ist dies dieselbe Pixelgröße wie bei [Zintl, 2021], wodurch ein Vergleich der Ergebnisse erleichtert wird. Für den Pasinger Klostergarten wurden 4 cm gewählt, da die Punktwolke größer ist und vor allem eine größere Ausdehnung in der horizontalen Ebene aufzeigt. Dies wirkt sich unter anderem ungünstig auf die Laufzeit aus (vgl. Kapitel 5.6 und Diagramm 5.1). Wie Diagramm 5.1 zeigt, kann durch die Wahl der größeren Pixelgröße insbesondere für den Pasinger Klostergarten die Laufzeit entscheidend gesenkt werden. Dabei ist die Kurve für die Arcisstraße Süd in grün, für die Arcisstraße Nord in blau und für den Pasinger Klostergarten

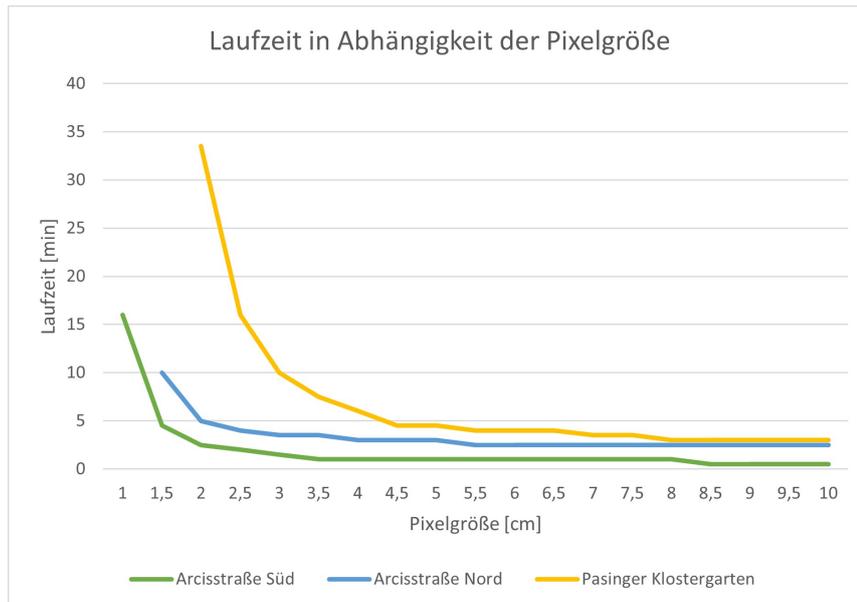


Abbildung 5.1: Laufzeit des gesamten Extraktionsprozesses in Abhängigkeit von der Pixelgröße.

in gelb eingefärbt. Die Kurven der größeren Punktwolken Arcisstraße Nord und Pasinger Klostergarten fangen erst bei einer Pixelgröße von 1,5 cm beziehungsweise 2 cm an, da bei kleinerer Pixelgröße nicht genug Speicherplatz für die Berechnung zur Verfügung steht. Darüber hinaus ist die Genauigkeit der Baumstandorte im Park im Normalfall im Kontext eines Baumkatasters weniger relevant wie an der Straße. Beispielsweise zur Einschätzung von Sichtprofileinschränkungen oder zur Bestimmung des Lichtraums müssen die Baumstandorte an der Straße eine gewisse Genauigkeit aufweisen. Im Park spielen dagegen diese Anwendungsfälle eine untergeordnete Rolle, da es sich mehrheitlich um Fußgänger- und Radwege handelt. Somit ist eine größere Pixelgröße für den Pasinger Klostergarten sinnvoll.

Für den Parameter *num\_peaks* andererseits ist die Festlegung eines Werts unter logischen Gesichtspunkten nicht möglich. Er hängt entscheidend von der Punktwolke ab und beeinflusst die Korrektheit sowie Vollständigkeit der Ergebnisse im Hinblick auf die Anzahl der detektierten Bäume. Daher wird dieser Parameter in Kapitel 5.3 näher untersucht und die Ergebnisse zur Anzahl der detektierten Bäume in Abhängigkeit von diesem angegeben.

Tabelle 5.1: Übersicht über die Parameter des Bildverarbeitungsansatzes zur Extraktion von Baumparametern.

Funktion	Parameterbezeichnung	Wert	Beschreibung
<i>imageProcessing_approach()</i>	<i>pysize_binary_img</i>	Wert abhängig vom Datensatz	Pixelgröße der Binärbilder. Wird in Kapitel 3.3.1 näher beleuchtet.
<i>imageProcessing_approach()</i>	<i>pysize_crown_img</i>	0,1 m	Pixelgröße des Grauwertbilds der Baumkronen. Wert nach [Zintl, 2021] gesetzt. Wird in Kapitel 3.3.1 näher beleuchtet.
<i>closing()</i>	<i>kernel</i>	Einheitsmatrix 6x6	Closing mit großem Kernel, um ungewollte Konturen zu verbinden.
<i>opening()</i>	<i>kernel</i>	Einheitsmatrix 5x5	Opening mit großem Kernel, um Rauschen zu entfernen und Konturen abzurunden.
<i>createImage_his()</i>	z-Wert Bereich	1,2-1,4 m für BHD-Binärbild; 0,4-1,4 m für Stamm-Binärbild	z-Wert Bereich für die Schichtdicke der Binärbilder. Wird in Kapitel 3.3.1 näher erläutert.
<i>createImage_his()</i>	<i>threshold</i>	0,5	Ein Punkt genügt, um ein Pixel im Binärbild weiß zu färben.

<i>bwareafilt()</i>	<i>area_range</i>	1 pxl bis $\frac{\pi \cdot dbh_{max}^2}{4 \cdot pxlsize\_binary\_img^2}$	Cluster mit mehr beziehungsweise weniger Pixeln werden aus den Bildern entfernt. Siehe Kapitel 3.3.2.
<i>canny()</i>	<i>low_threshold;</i> <i>high_threshold</i>	10% bzw. 20% des Datentypenmaximalwerts	Untere und obere Grenze für die Hysterese-Schwellenwerte (Verknüpfung von Kanten). Siehe Kapitel 3.3.2.
<i>canny()</i>	<i>sigma</i>	2	Standardabweichung des Gauß-Filters. Siehe Kapitel 3.3.2.
<i>hough_circle()</i> , <i>hough_circle_peaks()</i>	<i>hough_radii</i>	<i>pxlsize_binary_img</i> bis 1 m	Radien, bei denen die Hough-Transformation berechnet werden soll. Siehe Kapitel 3.3.2.
<i>hough_circle_peaks()</i>	<i>min_xdistance;</i> <i>max_ydistance</i>	1 pxl	Mindestabstand zwischen den Kreiszentren in x- bzw. y-Richtung. Siehe Kapitel 3.3.2.
<i>hough_circle_peaks()</i>	<i>threshold</i>	$0,5 \cdot \max(hspace)$	Minimale Intensität der Spitzen in jedem Hough-Raum. Siehe Kapitel 3.3.2.
<i>hough_circle_peaks()</i>	<i>num_peaks</i>	Wert abhängig vom Datensatz und der Ergebniserwartung	Maximale Anzahl von Spitzenwerten in jedem Hough-Raum. Siehe Kapitel 3.3.2.
<i>hough_circle_peaks()</i>	<i>normalize</i>	True	Der Akkumulator wird durch den Radius normalisiert, um die markanten Spitzen zu sortieren.

<i>find_similar-Circles()</i>	<i>tolerance</i>	3 pxl	Innerhalb der Toleranz müssen die Kreise aus BHD- und Stamm-Binärbild zusammenpassen. Siehe Kapitel 3.3.2.
<i>regionGrowing()</i>	<i>thresh</i>	0,1	Absoluter Schwellenwert, der einbezogen werden muss. Wert nach [Zintl, 2021] gesetzt.
<i>regionGrowing()</i>	<i>maxDist</i>	150 pxl	Maximale Distanz zur Initialposition des Region Growing. Wert nach [Zintl, 2021] gesetzt.
<i>regionGrowing()</i>	<i>maxDistMitte</i>	15 pxl	Zweite maximale Distanz zur Initialposition. Wert nach [Zintl, 2021] gesetzt.

## 5.1 Vorverarbeitung

Die Vorverarbeitung der bereitgestellten MLS-Datensätze der Arcisstraße fand bereits nach der Datenaufnahme statt und wurde vom TUM-PF durchgeführt. Die Datensätze sowie die vorgenommenen Vorverarbeitungsschritte sind in Kapitel 4.1.1 näher erläutert. Der verwendete Datensatz des Pasinger Kloostergartens dagegen (vgl. Kapitel 4.2) hat neben der Georeferenzierung noch keine Vorverarbeitung erfahren. Daher wird für las-Dateien eine optionale Vorverarbeitung mit den Methoden implementiert, welche in Kapitel 3.1 festgelegt sind. Für Datensätze in anderen Dateiformaten wie zum Beispiel pcd-Dateien ist diese Vorverarbeitung nur teilweise umgesetzt aufgrund von Einschränkungen der für diese Formate verwendeten Open3D-Bibliothek.

Die Vorverarbeitungsmaßnahmen aus Kapitel 3.1 müssen insbesondere beim Filtern der Punktwolke mit dem SOR-Filter individuell auf die Punktwolke abgestimmt werden. Sie bedingen sich unter anderem durch die Größe und die Punktdichte der Punktwolke als auch durch den Rauschanteil. Der SOR-Filter definiert sich durch zwei Parameter: Zum einen durch die Anzahl der zu analysierenden Nachbarn *nb\_neighbors* für jeden Punkt und zum anderen durch das Verhältnis

Tabelle 5.2: Auswirkung der nacheinander angewendeten Vorverarbeitungsmaßnahmen auf die Punktzahl des Pasinger-Klostergarten-Datensatzes.

	Punktzahl	Prozent
Ohne Vorverarbeitung	28.948.031	100%
Filterung der Intensitätswerte 0 und 255	28.742.686	99%
Entfernung von duplizierten Punkten	28.742.645	99%
Entfernung von nicht-endlichen Werten	28.742.645	99%
SOR-Filter ( $nb\_neighbors = 10$ ; $std\_ratio = 2,0$ )	27.927.652	96%

der Standardabweichung  $std\_ratio$ . Für den Pasinger-Klostergarten-Datensatz werden die Werte 10 und 2,0 verwendet. Die Auswirkung aller Vorverarbeitungsmaßnahmen auf die Punktzahl zeigt Tabelle 5.2, in welcher vor allem die Datenreduktion von 4% (etwa 1.000.000 Punkte) gut erkennbar ist.

## 5.2 Bodenverarbeitung

Die Bodenverarbeitung wird nach dem geschilderten Verfahren in Kapitel 3.2 für alle Datensätze durchgeführt. Dabei werden zunächst die Bodenpunkte mittels des CSF (vgl. Kapitel 2.4) von der restlichen Punktwolke getrennt. Dies hat nach der Vorverarbeitung eine weitere deutliche Reduktion der Punktzahl zur Folge, was in Tabelle 5.3 verdeutlicht wird. Diese listet die Punktzahl der Bodenpunktwolke und der restlichen Punktwolke für die drei Datensätze auf. Zudem werden die Punktwolken zur weiteren Verarbeitung ohne Boden benötigt.

Der CSF verwendet neun Parameter, die in Tabelle 2.1 mit ihrer Beschreibung und ihren Standardwerten aufgeführt sind. Die Standardwerte wurden von Zhang et al. [2016] in mehreren Tests ermittelt und funktionieren für die meisten Situationen. Dennoch müssen diese gegebenenfalls für jede Punktwolke individuell angepasst werden, was eine potenzielle Einschränkung der Automatisierung darstellt. Dabei muss der Nutzer vor allem die vier Parameter *rigidness*, *time\_step*, *cloth\_resolution* und *slop\_smooth* beachten [Zhang et al., 2016]. Für die gegebenen Datensätze hat sich gezeigt, dass alle Parameter in den Standardeinstellungen verwendet werden können, wodurch für die weitere Auswertung durch den CSF keine Einschränkungen bei der Automatisierung entstehen. Details und Experimente zu den einzelnen Parametern können in [Zhang et al., 2016] nachvollzogen werden. Hierbei hat sich herausgestellt, dass speziell für ebene urbane Gebiete, wo-

Tabelle 5.3: Ergebnis des CSF für die unterschiedlichen Testgebiete.

Testgebiet	Punktzahl Bodenpunktwolke	Punktzahl restliche Punkt wolke
Arcisstraße Süd	3.732.838	4.271.341
Arcisstraße Nord	8.656.701	14.490.199
Pasinger Klostergarten	14.918.429	13.009.223

für auch die die hier vorgestellte Methodik konzipiert wurde, der CSF im Normalfall zuverlässig in den Standardeinstellungen funktioniert. Die Ergebnisse des CSF für alle Testgebiete sind in Tabelle 5.3 aufgeführt und die Bodenpunktwolken sind zudem in den Abbildungen 5.2a, 5.3a und 5.4a visualisiert.

Als zweiter Schritt in der Methodik wird die Punkt wolke ohne Boden unter Verwendung der Bodenpunkt wolke auf eine einheitliche Höhenbezugsfläche reduziert (vgl. Abbildung 3.3). Dazu wird die Bodenpunkt wolke mit einer definierten Rasterzellengröße gerastert, wodurch diese maßgeblich das Ergebnis der Bodenverarbeitung beeinflusst. Die Wahl des Parameterwertes und sein Standardwert von 1 m wird in Kapitel 3.2 näher erläutert. Für alle Testdatensätze wurde der Standardwert beibehalten, da der Boden in allen Gebieten überwiegend flach ist.

Die jeweiligen resultierenden Höhengitter für die Testdatensätze stellen die Abbildungen 5.2b, 5.3b und 5.4b dar. Die Grundfläche der Gebiete ist klar erkennbar und Höhenvariationen im Gelände werden gut aufgelöst. Dies wird bei einem Vergleich mit den zugrundeliegenden Bodenpunkt wolken in den Abbildungen 5.2a, 5.3a beziehungsweise 5.4a deutlich. Der Farbverlauf der Bodenpunkt wolke ist oft heller als der des Höhengitters, da die dreidimensionale Punkt wolke von oben betrachtet wird. Dadurch werden in der zweidimensionalen Abbildung hauptsächlich die höchsten Punkte dargestellt. Das zweidimensionale Höhengitter dagegen zeigt die medialen Höhenwerte aller Punkte in der entsprechenden Bodenrasterzelle und stellt so ein scheinbar insgesamt niedriger liegendes Gelände dar.

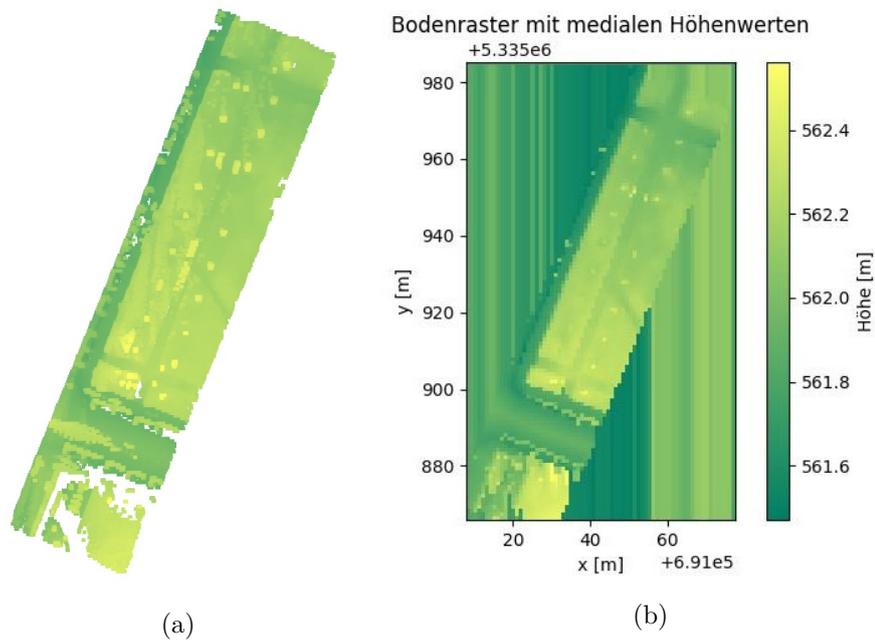


Abbildung 5.2: Ergebnis der Bodenverarbeitung der Arcisstraße Süd (eigene Darstellungen). Die Colorbar der rechten Abbildung findet für beide Darstellungen Anwendung. a Bodenpunktwolke eingefärbt nach den Höhenwerten. b Ergebnisplot des Bodenrasters mit medialen Höhenwerten.

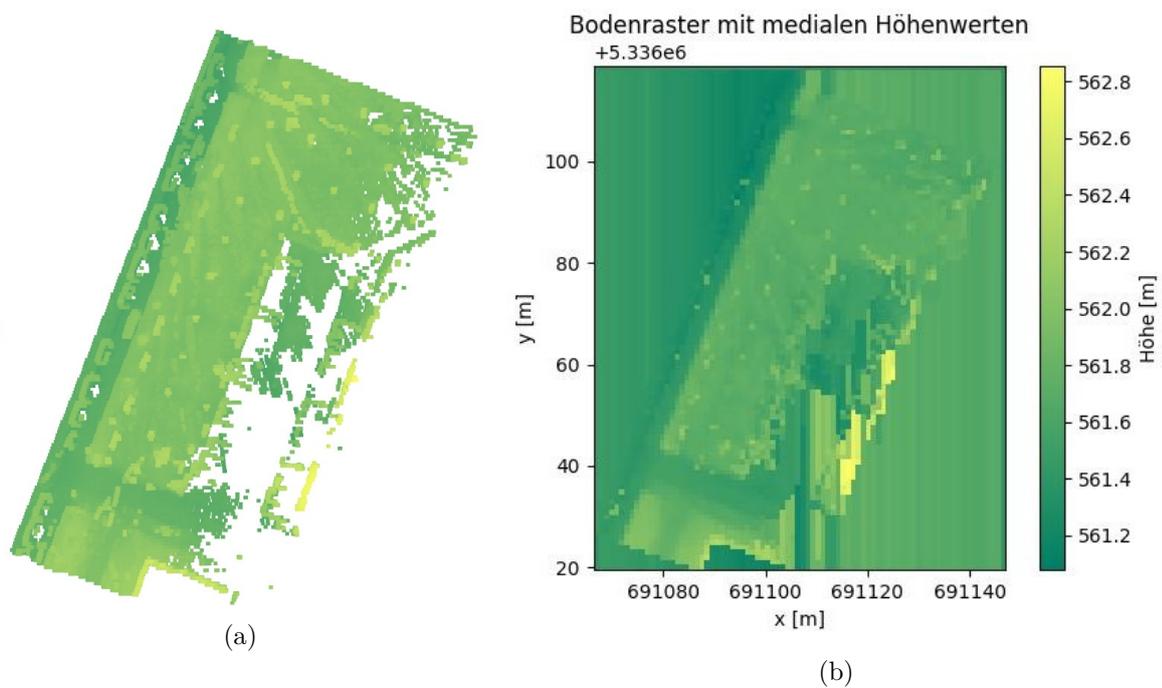


Abbildung 5.3: Ergebnis der Bodenverarbeitung der Arcisstraße Nord (eigene Darstellungen). Die Colorbar der rechten Abbildung findet für beide Darstellungen Anwendung. a Bodenpunktwolke eingefärbt nach den Höhenwerten. b Ergebnisplot des Bodenrasters mit medialen Höhenwerten.

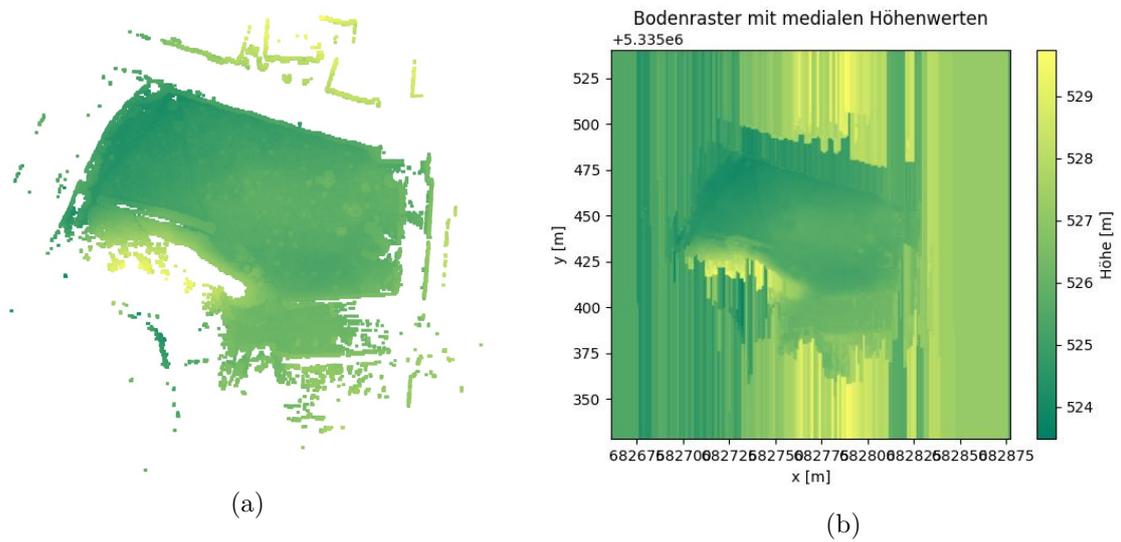


Abbildung 5.4: Ergebnis der Bodenverarbeitung des Pasinger Klostergartens (eigene Darstellungen). Die Colorbar der rechten Abbildung findet für beide Darstellungen Anwendung. a Bodenpunktwolke eingefärbt nach den Höhenwerten. b Ergebnisplot des Bodenrasters mit medialen Höhenwerten.

### 5.3 Anzahl detektierter Bäume

Die Bäume werden mit Hilfe der zirkularen Hough-Transformation in den beiden Binärbildern als Kreise detektiert (vgl. Kapitel 3.3). Dabei spielt insbesondere der Parameter *num\_peaks* eine wesentliche Rolle, wie bereits am Kapitelanfang und in Kapitel 3.3 erwähnt. Daher werden im Folgenden die Ergebnisse zur Detektion der Bäume abhängig von diesem Parameter dargestellt. Als Genauigkeitsmaße für die Detektion werden die Größen Korrektheit und Vollständigkeit genauso wie bei [Zintl, 2021; Rutzinger et al., 2011] oder in der Ausschreibung der Landeshauptstadt München [Landeshauptstadt München, 2023] angewendet. Für die beiden Größen gelten nach [Landeshauptstadt München, 2023] folgende Formeln:

$$\text{Korrektheit} = \frac{\text{korrekt erfasste Objekte}}{\text{korrekt erfasste Objekte} + \text{falsch typisierte Objekte}} \quad (5.3.1)$$

$$\text{Vollständigkeit} = \frac{\text{korrekt erfasste Objekte}}{\text{korrekt erfasste Objekte} + \text{nicht erkannte Objekte}} \quad (5.3.2)$$

Dabei repräsentiert die Korrektheit das Verhältnis zwischen den korrekt erfassten Objekten zur Anzahl der insgesamt im Testgebiet erfassten Objekte. Dagegen die Vollständigkeit beschreibt das Verhältnis zwischen den korrekt erfassten Objekten zur Gesamtanzahl der im Testgebiet vorhandenen Objekte. Die Bewertung, ob ein Baum richtig oder falsch detektiert wird, wird manuell anhand der Ergebnisbilder festgestellt, um das Ergebnis zu validieren. Drei Beispiele für solche Ergebnisbilder zeigen die Abbildungen 5.10, 5.11 und 5.12.

Für den Pasinger Klostergarten wird zur manuellen Bewertung des Detektionsergebnisses aufgrund der Unübersichtlichkeit des Geländes lediglich die Streuobstwiese ohne die drei mit Gebüsch verwachsenen Baumgruppen herangezogen. Diese Baumgruppen werden ausgeschlossen, da die Stämme bis über 1,30 m Höhe bewachsen sind und so zum einen die Detektion der Stämme im Binärbild erschwert. Zum anderen kann der BHD der Bäume nicht fehlerfrei bestimmt werden. Das Gebiet ist in Abbildung 5.5 in blau eingezeichnet, die Baumgruppen in hellgrün und alle 51 Bäume sind mit grünen Punkten markiert. Werden Objekte außerhalb dieses Gebiets als Bäume erkannt, die nicht eindeutig keine Bäume sind, werden diese vom Gesamtergebnis ausgenommen und als „unklar“ eingestuft. So werden Falschaussagen vermieden. Die Gebiete Arcisstraße Süd und Nord hingegen sind deutlich übersichtlicher und eine Bewertung der richtig oder falsch detektierten Bäume ist einfacher möglich. Daher wird hier die Kategorie „unklar“ nicht benötigt. Die Gebiete mit ihren 23 beziehungsweise 52 Bäumen sind jeweils in Abbildung 5.6 veranschaulicht.

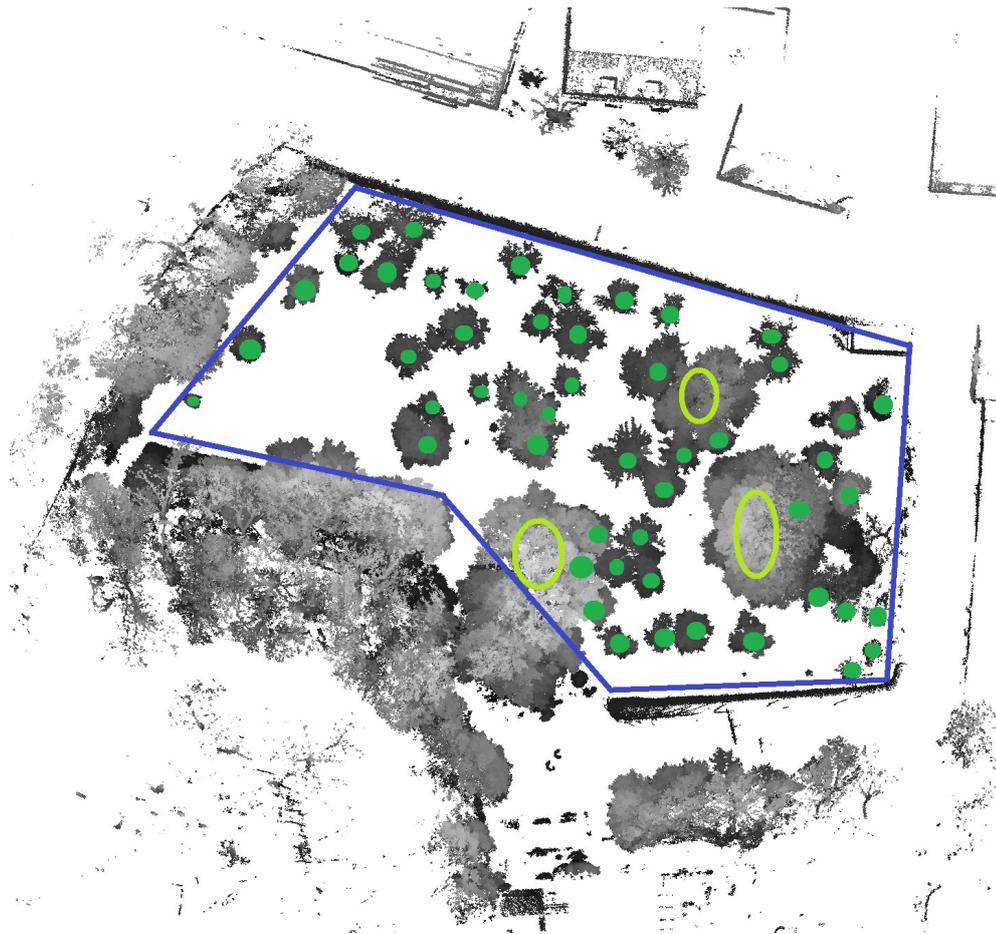


Abbildung 5.5: Gebietsdefinition des Pasinger Klostergartens für die Auswertung. Grenzen der Streuobstwiese in blau, Baumgruppen in hellgrün und 51 Bäume in grün markiert.

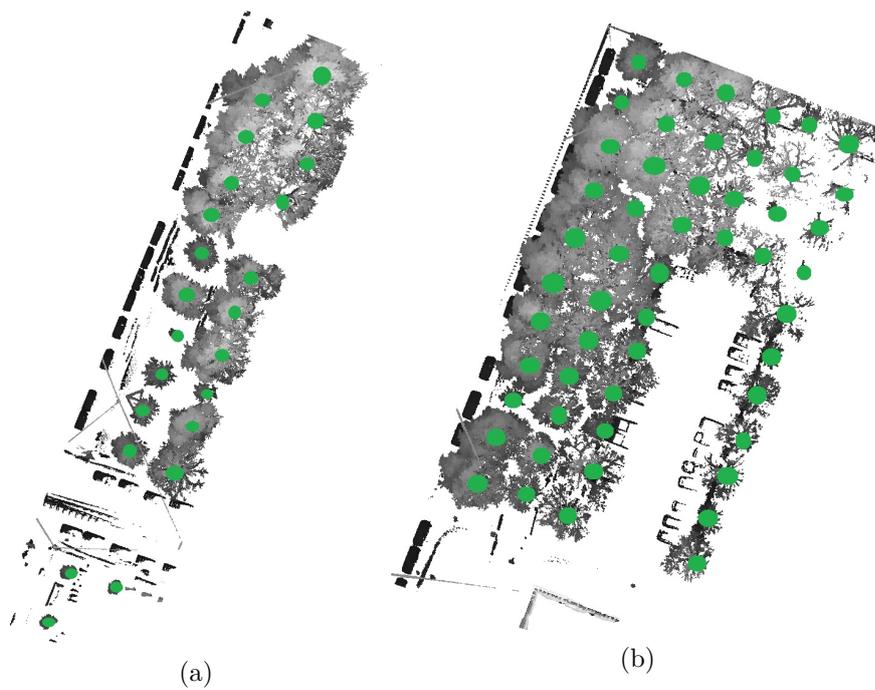


Abbildung 5.6: Gebietsüberblick der Arcisstraße a Süd und b Nord mit eingezeichneten Baumstandorten in grün.

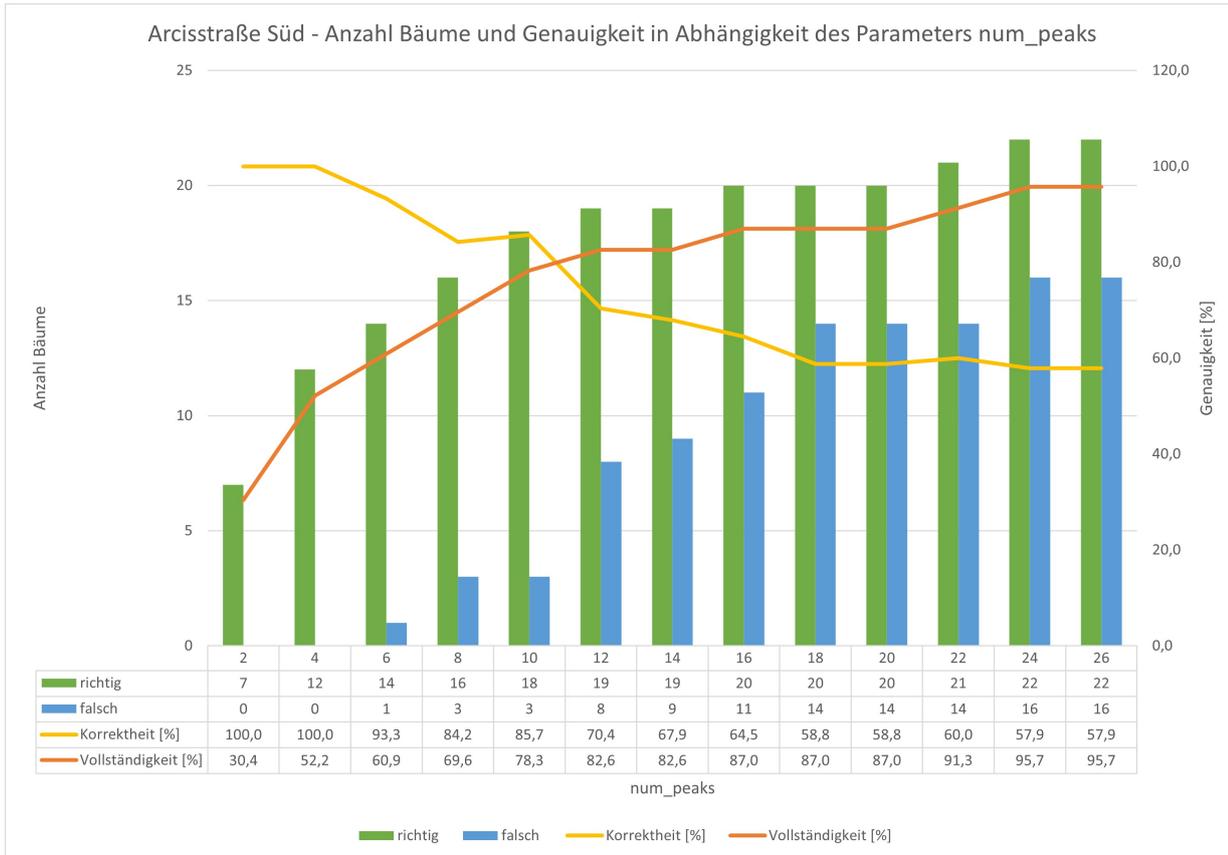


Abbildung 5.7: Ergebnisdiagramm der Anzahl der detektierten Bäume in Abhängigkeit des Parameters *num\_peaks* im Testgebiet Arcisstraße Süd. Auf der Primärachse ist die Anzahl der richtig (grün) und falsch (blau) detektierten Bäume aufgetragen. Auf der Sekundärachse ist die Korrektheit (gelb) und die Vollständigkeit (orange) dargestellt. Die Gesamtanzahl der Bäume liegt bei 23.

Die Diagramme 5.7, 5.8 und 5.9 zeigen die Ergebnisse für die Detektion der Bäume mit der Hough-Transformation in Abhängigkeit des Parameters *num\_peaks* für die einzelnen Testgebiete. Die Diagramme sind Verbunddiagramme, welche die Anzahl der richtig (grün), falsch (blau) und im Falle des Pasinger Klostersgartens unklar (grau) detektierten Bäume als Säulendiagramme darstellen. Die Genauigkeitsmaße Korrektheit (gelb) und Vollständigkeit (orange) sind als Liniendiagramme auf der Sekundärachse aufgetragen. Zusätzlich sind die genauen Werte jeweils in einer Tabelle unterhalb der Diagramme aufgelistet, sodass diese nicht direkt aus dem Diagramm abgelesen werden müssen.

Für alle drei Testgebiete zeigt sich dabei derselbe eindeutige Trend: Mit zunehmendem *num\_peaks*-Wert nimmt die Vollständigkeit der detektierten Bäume zu, während die Korrektheit abnimmt. Der höchste Wert für die Korrektheit wird jeweils mit 100% bei *num\_peaks* = 1 beziehungsweise 2 erzielt, während der höchste Vollständigkeitswert mit 95,7% für die Arcisstraße Süd, 90,4% für die Arcisstraße Nord und 70,6% für den Pasinger Klostersgarten bei *num\_peaks* = 24, 35 beziehungsweise 35 erzielt wird.

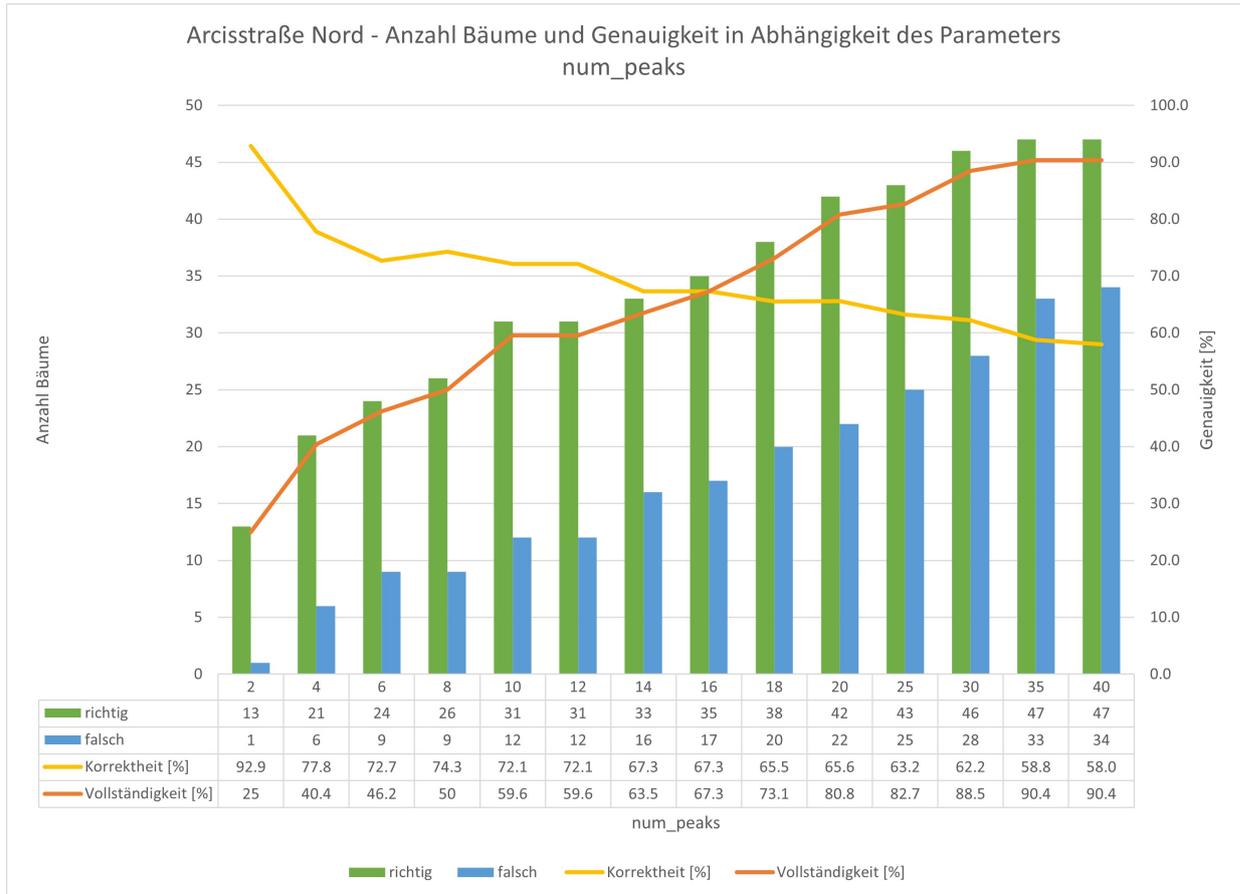


Abbildung 5.8: Ergebnisdiagramm der Anzahl der detektierten Bäume in Abhängigkeit des Parameters *num\_peaks* im Testgebiet Arcisstraße Nord. Auf der Primärachse ist die Anzahl der richtig (grün) und falsch (blau) detektierten Bäume aufgetragen. Auf der Sekundärachse ist die Korrektheit (gelb) und die Vollständigkeit (orange) dargestellt. Die Gesamtanzahl der Bäume liegt bei 52.

hingweise 60 erreicht wird. Der maßgebliche Wertebereich von *num\_peaks* ist für die Testgebiete dabei unterschiedlich. Für die Arcisstraße Süd wird dieser in Diagramm 5.7 in Zwischenschritten von 2 bis 26 dargestellt, wohingegen der Wertebereich für den Datensatz des Pasinger Klostersgartens von 1 bis 70 reicht (Abbildung 5.9). Die Arcisstraße Nord (Abbildung 5.8) befindet sich zwischen den beiden Extremen, weshalb die Werte von 2 bis 20 in Zwischenschritten angegeben werden und der anschließende Bereich von 20 bis 40 in Fünferschritten auf der horizontalen Achse aufgezeichnet ist. Im unteren Bereich reagiert das Ergebnis noch sensibler auf die Parameterveränderungen, während im oberen Bereich größere Schritte notwendig sind.

Da der Parameter *num\_peaks* einen so entscheidenden Einfluss auf die Korrektheit und die Vollständigkeit der Anzahl der detektierten Bäume hat, muss dieser je nach Zielsetzung und Aufgabe des Programms gesetzt werden. Liegt der Fokus auf der Vollständigkeit des zu generierenden Baumkatasters und können falsch detektierte Bäume gegebenenfalls manuell eliminiert werden,

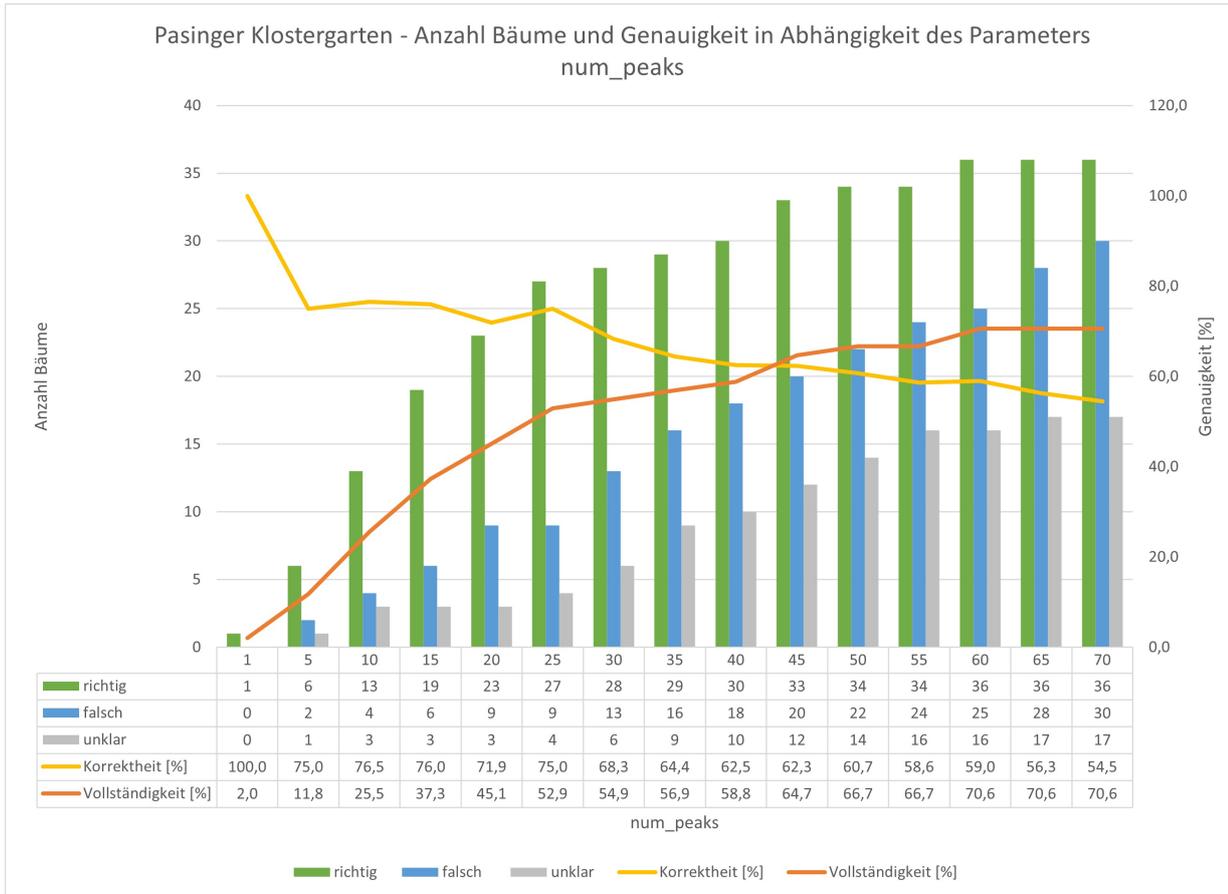


Abbildung 5.9: Ergebnisdiagramm der Anzahl der detektierten Bäume in Abhängigkeit des Parameters *num\_peaks* im Testgebiet Pasinger Klostergarten. Auf der Primärachse ist die Anzahl der richtig (grün), falsch (blau) und unklar (grau) detektierten Bäume aufgetragen. Auf der Sekundärachse ist die Korrektheit (gelb) und die Vollständigkeit (orange) dargestellt. Die Gesamtanzahl der Bäume liegt bei 51.

sollte der Parameterwert hoch gewählt werden. Liegt andererseits der Fokus auf der Automatisierung des Ablaufes und der Zuverlässigkeit der detektierten Bäume, sollte ein kleiner Wert für *num\_peaks* gesetzt werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Testgebiete mit dem jeweiligen Wert für *num\_peaks* dargestellt, welcher die höchstmögliche Korrektheit bei gleichzeitig höchstmöglicher Vollständigkeit liefert. Für die Arcisstraße Süd liegt dieser Wert bei 10, für die Arcisstraße Nord bei 16 und für den Pasinger Klostergarten bei 45 (vgl. Diagramme 5.7, 5.8 und 5.9).

Tabelle 5.4: Ausschnitt aus dem Ergebnis der extrahierten Baumparameter in der Arcisstraße Süd.

Index	x [m]	y [m]	z [m]	Baumhöhe [m]	BHD [m]	Kronendurchmesser [m]
0	691024,872	5335901,741	562,289	3	0,20	1
1	691018,947	5335879,316	561,947	7	0,35	3
2	691044,247	5335939,691	562,153	9	0,35	6
3	691028,172	5335911,716	562,288	11	0,35	1
4	691035,672	5335916,891	562,234	8	0,35	5
5	691038,322	5335923,841	562,215	5	0,35	2
6	691030,372	5335902,616	562,385	10	0,40	6
7	691033,222	5335909,941	562,266	9	0,45	6
8	691051,922	5335984,941	561,789	3	0,50	1
9	691041,272	5335931,991	562,166	13	0,55	8
10	691041,897	5335906,816	562,269	12	0,55	9

## 5.4 Extrahierte Baumparameter

Die Tabelle 5.4 führt eine beispielhafte Auflistung von aus dem automatisierten Verfahren resultierenden Baumparametern auf. Jede Zeile entspricht dabei einem detektierten Baum mit dreidimensionalen Koordinaten, Baumhöhe, BHD und Kronendurchmesser. Die gesamten numerischen Ergebnisse aus den drei Testgebieten können in Anhang G in den Tabellen G.1, G.2 und G.3 eingesehen werden. Zusätzlich werden die Standorte der Bäume in den Abbildungen 5.10, 5.11 und 5.12 visualisiert. Die Indizes der Bäume erlauben eine Zuordnung der Baumparameter aus den Tabellen zu den Standorten in der jeweiligen Abbildung.

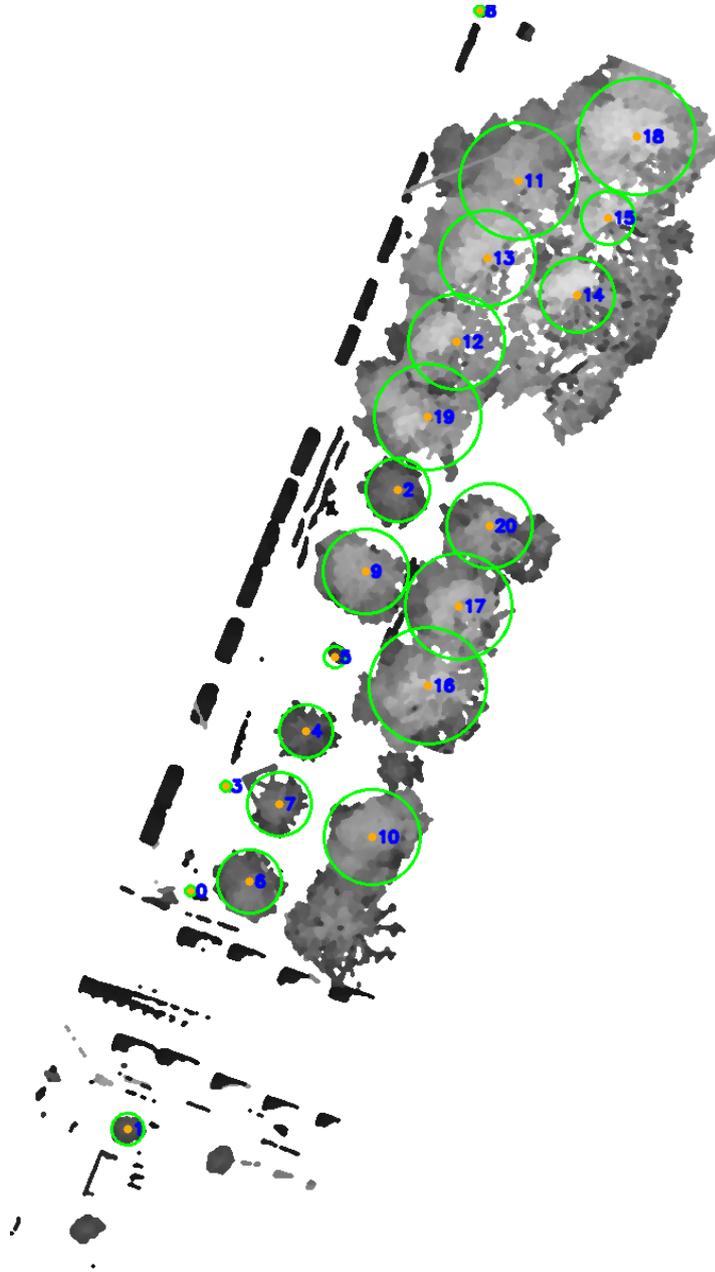


Abbildung 5.10: Ergebnis der detektierten Bäume in der Arcisstraße Süd für  $num\_peaks = 45$ . Die Baumstandorte sind durch orange Punkte mit blauen Zahlen als Indizes markiert mit der mittleren Kronenausdehnung als grüner Kreis.

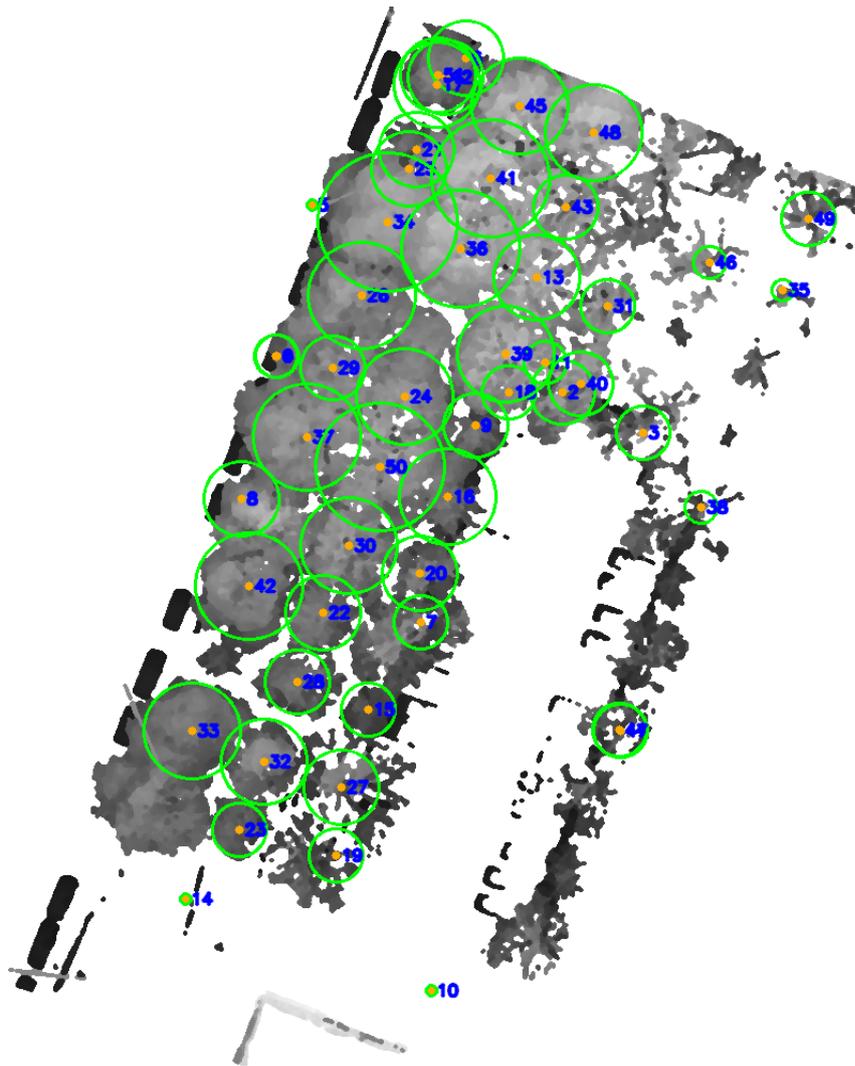


Abbildung 5.11: Ergebnis der detektierten Bäume in der Arcisstraße Nord für  $num\_peaks = 45$ . Die Baumstandorte sind durch orange Punkte mit blauen Zahlen als Indizes markiert mit der mittleren Kronenausdehnung als grüner Kreis.

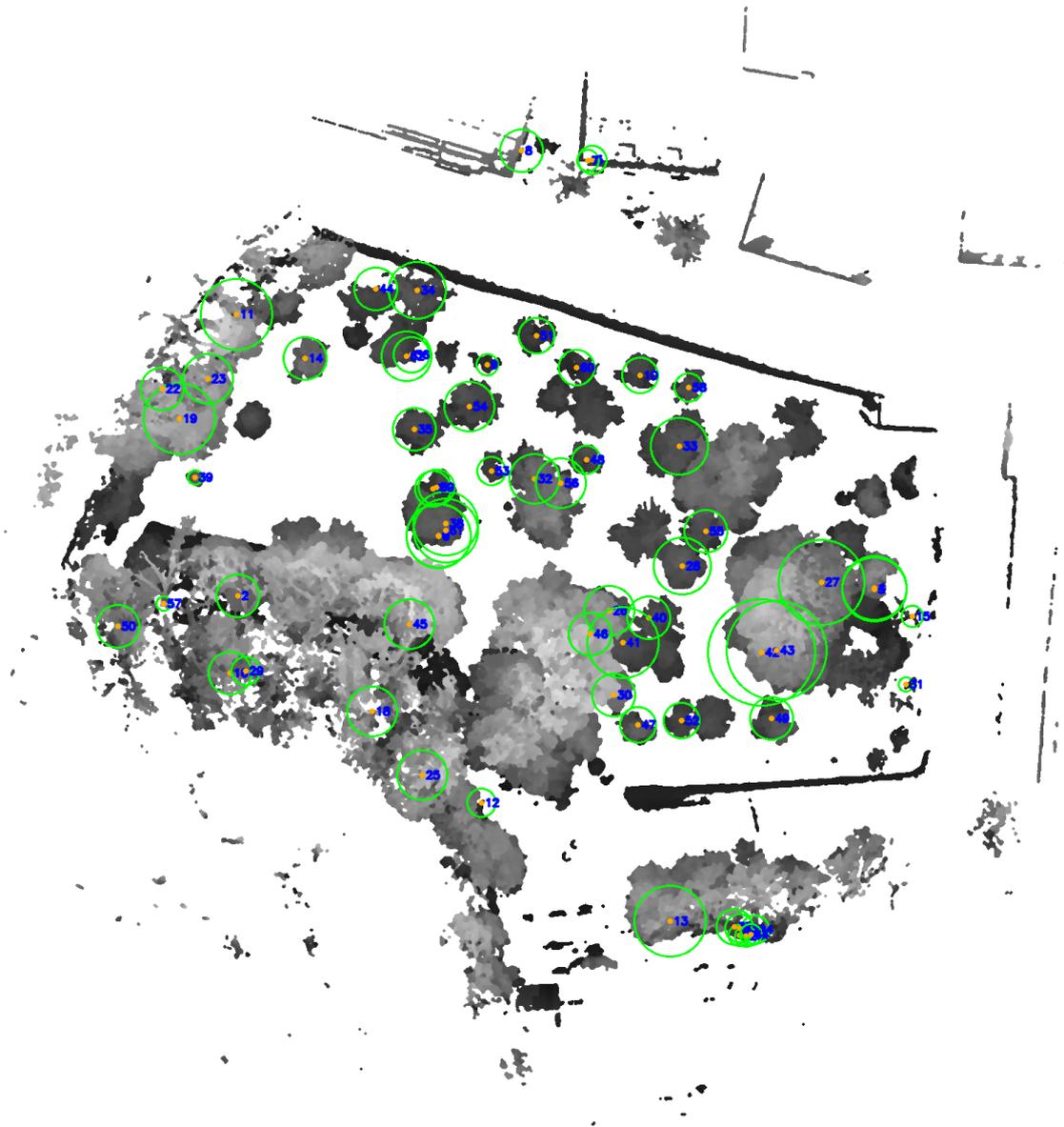


Abbildung 5.12: Ergebnis der detektierten Bäume im Pasinger Klostergarten für  $num\_peaks = 45$ . Die Baumstandorte sind durch orange Punkte mit blauen Zahlen als Indizes markiert mit der mittleren Kronenausdehnung als grüner Kreis.

## 5.5 Baumkataster im CityGML-Format

Mit Hilfe des in Abbildung 3.8 dargestellten FME-Workflows werden aus den extrahierten Parametern *SolitaryVegetationObjects* mit Kugel-Zylinder-Geometrie modelliert. Ein Ausschnitt aus einer solchen resultierenden CityGML-Datei zeigt Abbildung 5.13. Es wird CityGML 1.0 verwendet, da die 3D-Gebäudemodelle mit denen die Daten kombiniert werden sollen ebenfalls Version 1.0 sind. Durch die Änderung einer Einstellung an den Nutzer Parametern des FME-Workflows sind aber genauso Ergebnisse in anderen Versionen erzeugbar. In der dritten Zeile der Datei werden die CityGML-spezifischen Namensräume festgelegt und in Zeile 4 bis 9 wird die Bounding Box des Darstellungsbereichs definiert. Danach folgt die Auflistung aller *CityObjectMember*, zu denen unter anderem *SolitaryVegetationObjects* zählen. Sie haben jeweils die Attribute *height* für die Baumhöhe, *trunkDiameter* für den BHD und *crownDiameter* für den mittleren Kronendurchmesser. In den darauffolgenden Zeilen wird die Geometrie der Baumobjekte beschrieben, welche aus vielen einzelnen Flächen zusammengesetzt ist. Insgesamt hat ein solches Dokument mit zum Beispiel 20 Bäumen aufgrund der komplex erzeugten Geometrie eine Länge von über 450.000 Zeilen.

Diese *SolitaryVegetationObjects* können anschließend in ein schon bestehendes semantisches Stadtmodell eingefügt werden, solange die zugrundeliegenden Referenzsysteme für Lage und Höhe übereinstimmen. Als 3D-Stadtmodell wird im Folgenden das semantische 3D-Gebäudemodell der bayerischen Vermessungsverwaltung genutzt (vgl. Kapitel 4.3). Im Fall der hier verwendeten georeferenzierten Punktwolken muss an die Arcisstraßen-Baumobjekte eine Höhenkorrektur durch Subtraktion der Höhenanomalie  $\zeta$  angebracht werden, um von den geometrischen Höhen  $h$  der Punktwolke zu schwerefeldbezogenen Gebrauchshöhen  $H^N$  des 3D-Stadtmodells zu gelangen. Hierbei gilt die Formel nach [Guo, 2023]:

$$H^N = h - \zeta \quad (5.5.1)$$

Die Daten aus dem Pasinger Klostergarten sind im Gegensatz dazu schon in den zum Stadtmodell passenden Referenzsystemen verortet. Nach der etwaigen Höhenkorrektur können die in den Testgebieten entstandenen Baumkataster im Zusammenhang mit dem 3D-Stadtmodell visualisiert werden, was Abbildung 5.14 zeigt. Da es sich um eine semantische und nicht nur visuelle 3D-Darstellung handelt, werden darüber hinaus auch die zu Beginn genannten Simulationen möglich (vgl. Kapitel 1 und 3.5).

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?><!-- FME Desktop 2016.1 3D Solution Templates -->
2 <!-- con terra GmbH and virtualcitySYSTEMS GmbH -->
3 <core:CityModel xmlns:tex="http://www.opengis.net/citygml/texturedsurface/1.0" xmlns:sch="http://www.ascc.ne
4 <gml:boundedBy>
5 <gml:Envelope srsName="urn:adv:crs:EPSG:31467*DE_DHHN92_NH" srsDimension="3">
6 <gml:lowerCorner>691015.722 5335874.591 561.493</gml:lowerCorner>
7 <gml:upperCorner>691072.1969999999 5335985.441000001 579.65</gml:upperCorner>
8 </gml:Envelope>
9 </gml:boundedBy>
10 <core:cityObjectMember>
11 <veg:SolitaryVegetationObject gml:id="UUID_51b17add-fe74-4f68-827c-8e8f404f0aff">
12 <veg:height uom="#m">10.774000000000001</veg:height>
13 <veg:trunkDiameter uom="#m">0.15</veg:trunkDiameter>
14 <veg:crownDiameter uom="#m">2</veg:crownDiameter>
15 <veg:lod4Geometry>
16 <gml:MultiGeometry srsName="urn:adv:crs:EPSG:31467*DE_DHHN92_NH" srsDimension="3">
17 <gml:geometryMember>
18 <gml:Solid>
19 <gml:exterior>
20 <gml:CompositeSurface>
21 <gml:surfaceMember>
22 <gml:CompositeSurface>
23 <gml:surfaceMember>
24 <gml:Polygon>
25 <gml:exterior>
26 <gml:LinearRing>
27 <gml:posList>691045.796607 5335968.428982001 571
28 </gml:LinearRing>
29 </gml:exterior>
30 </gml:Polygon>
31 </gml:surfaceMember>
32 <gml:surfaceMember>
33 <gml:Polygon>
34 <gml:exterior>
35 <gml:LinearRing>
36 <gml:posList>691044.9973929999 5335968.428982001
37 </gml:LinearRing>
38 </gml:exterior>
39 </gml:Polygon>
40 </gml:surfaceMember>
41 <gml:surfaceMember>
42 <gml:Polygon>
43 <gml:exterior>
44 <gml:LinearRing>
45 <gml:posList>691045.796607 5335966.603018001 571
46 </gml:LinearRing>
47 </gml:exterior>

```

Abbildung 5.13: Ausschnitt aus einer aus dem FME-Workflow resultierenden CityGML-Datei.

## 5.6 Laufzeitbetrachtung

Die Gesamtlaufzeit des Programms ist mit 15 min und 8 s für den Pasinger Klostergarten klar am längsten, während sie für die Arcisstraße Nord etwa ein Drittel kürzer ist und 9 min und 12 s beträgt. Für die Arcisstraße Süd ist die Laufzeit mit 3 min und 34 s am kürzesten. Bei der Betrachtung der Laufzeiten muss die unterschiedlich gewählte Pixelgröße der Binärbilder beachtet werden, da diese sich entscheidend auf die Laufzeit auswirkt. Am Kapitelanfang wurde hierauf schon näher eingegangen und ist außerdem in Abbildung 5.1 dargestellt.

Trotz der größeren Pixelgröße hat der Pasinger Klostergarten die längste Gesamtlaufzeit, da der Datensatz im Vergleich zu beiden Arcisstraßengebieten aus mehr Punkten besteht und darüber hinaus eine deutlich größere Ausdehnung in der horizontalen Ebene aufweist. Dadurch hat dieser die größte Bodenfläche und somit auch die größte Anzahl an Bodenpunkten (vgl. Tabelle 5.3). Dies bewirkt eine deutlich längere Laufzeit im Programmabschnitt „Einheitliches Höhenlevel“, welcher die Erzeugung des Bodengitters sowie die Anpassung der Höhenwerte der Punktwolke

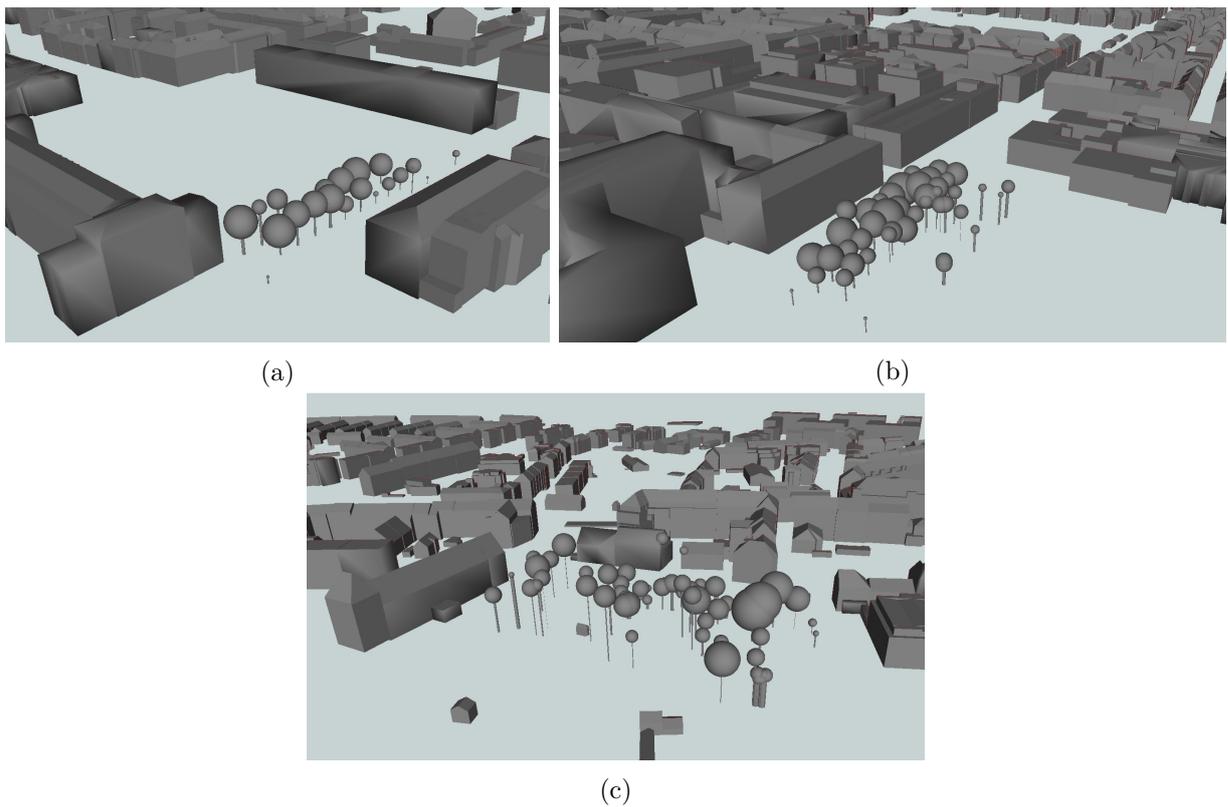


Abbildung 5.14: Semantische Darstellung der modellierten Bäume in CityGML in Verbindung mit dem bayerischen 3D-Gebäudemodell [Bayerische Vermessungsverwaltung, 2023c]. a Arcisstraße Süd. b Arcisstraße Nord. c Pasinger Klostersgarten.

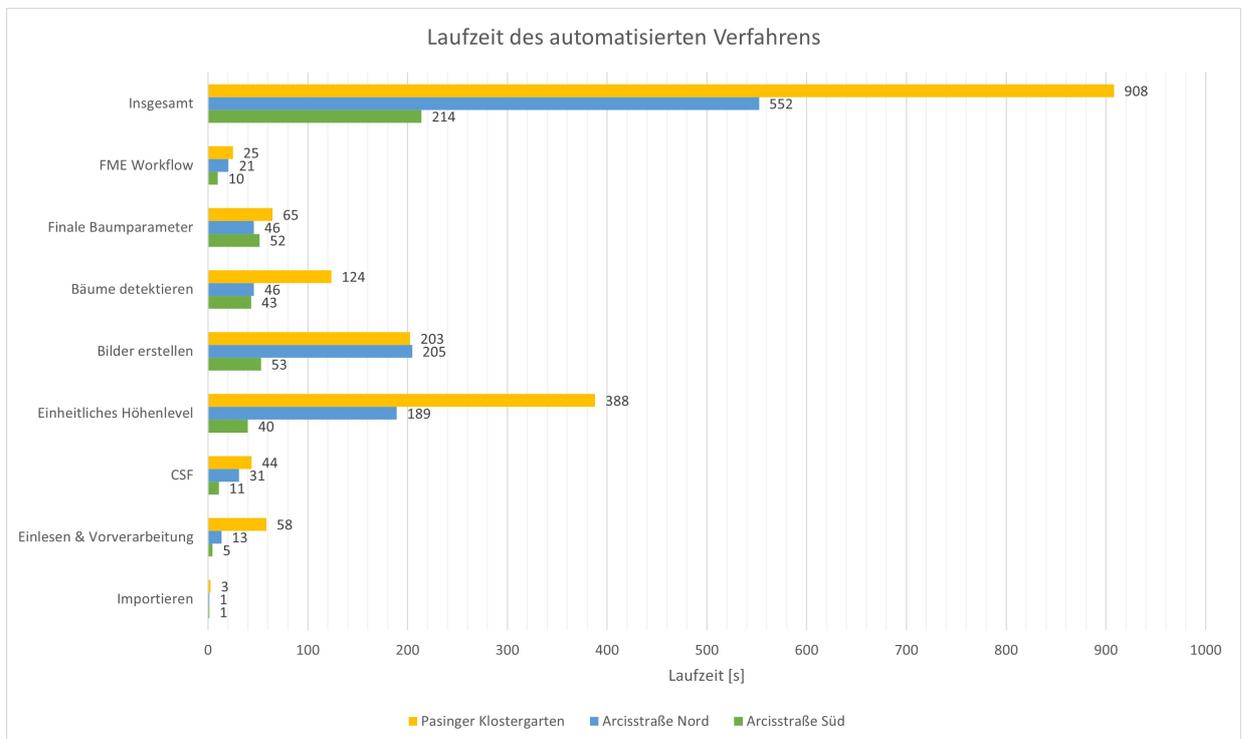


Abbildung 5.15: Laufzeit des automatisierten Verfahrens für die drei Testgebiete aufgliedert nach den einzelnen Programmteilen.

auf ein einheitliches Höhenlevel beinhaltet (vgl. Kapitel 3.2). Beim Erstellen der Bilder zeigt sich dagegen der Einfluss der größeren Pixelgröße der Binärbilder und die Laufzeit ist hier vergleichbar mit der der Arcisstraße Nord.

Weitere signifikante Unterschiede in der Laufzeit zeigen sich beim Pasinger Klostergarten beim Detektieren der Bäume und beim Einlesen mit Vorverarbeitung. Letzteres ist dem geschuldet, dass lediglich die Punktwolke des Pasinger Klostergartens Vorverarbeitungsmaßnahmen benötigt, während die beiden Punktwolken aus der Arcisstraße schon vorverarbeitet sind (vgl. Kapitel 5.1). Die Detektion der Bäume mit der Hough-Transformation dauert aufgrund der größeren Bilder und der größeren Anzahl an gefundenen Kreisen im BHD- sowie Stamm-Binärbild länger.

Die Laufzeitunterschiede zwischen den Testgebieten Arcisstraße Süd und Nord lassen sich alle durch die größere Punktzahl und Ausdehnung in der x-y-Ebene des Arcisstraßen-Nord-Datensatzes erklären. Dies hat vor allem in den Programmabschnitten „Bilder erstellen“ und „Einheitliches Höhenlevel“ Einfluss. Die längere Laufzeit bei der Arcisstraße Süd von 6 s bei der Ermittlung der finalen Baumparameter lässt sich durch Messungenauigkeiten erklären. Alle gemessenen Zeiten hängen stark vom verwendeten Endgerät und seinen Spezifikationen ab. Die Details zu dem in diesem Fall verwendeten Endgerät können in Anhang B eingesehen werden.

## 5.7 Vergleich zur zugrundeliegenden Bachelorarbeit

Ein direkter Vergleich der erzielten Ergebnisse zur zugrundeliegenden Bachelorarbeit [Zintl, 2021] ist nur bedingt möglich, da sehr viele Unterschiede bestehen. Diese reichen von den verwendeten Datensätzen über die entwickelte Methodik bis hin zur Implementierung. Dies wird im Folgenden überblicksartig aufgezeigt.

Während Zintl [2021] für das Testgebiet Arcisstraße Süd einen vergleichbaren Datensatz verwendet, wird für die Arcisstraße Nord ein stark vereinfachter beziehungsweise zugeschnittener Datensatz eingesetzt. Dazu wurden die drei nördlichsten Baumreihen aus dem Datensatz entfernt. Darüber hinaus wird das Testgebiet Pasinger Klostergarten nicht behandelt. Somit ist aus diesem Gesichtspunkt heraus lediglich ein Vergleich mit der Arcisstraße Süd und ein eingeschränkter Vergleich mit der Arcisstraße Nord möglich.

Bei der eingesetzten Methodik wird in dieser Arbeit und bei [Zintl, 2021] eine vergleichbare Vorverarbeitung der Daten zugrunde gelegt. Danach folgt allerdings ein grundlegend unterschiedliches Vorgehen bei der Bodenprozessierung, welches in Kapitel 3.2 aufgezeigt wird. Ein weiterer Un-

terschied in der Methodik liegt in der Verifikation der gefundenen Baumobjekte. Während hier die Kriterien aus [Hurst & Geiger, 2020] eingesetzt werden (vgl. Kapitel 3.3.4), werden bei [Zintl, 2021] die Baumobjekte anhand ihrer Baumkroneneigenschaften gefiltert.

Die Implementierung der jeweiligen Methodik unterscheidet sich zwischen [Zintl, 2021] und dieser Masterarbeit elementar. Die Bachelorarbeit wurde mit Matlab programmiert, während für die Masterarbeit Python eingesetzt wurde, da dies eine lizenzfreie Programmiersprache ist. Somit wurde sich zwar für die Implementierung am Code der Bachelorarbeit orientiert, allerdings nicht übereinstimmend umgesetzt. So wurden zum Beispiel nur bedingt vergleichbare Funktionen und Algorithmen aus Python spezifischen Bibliotheken verwendet, sowie programm- und umsetzungsspezifische Änderungen vorgenommen. Insbesondere die Hough-Transformation, welche eine entscheidende Rolle des Algorithmus darstellt, unterscheidet sich in ihrem Verhalten und ihren Parametern wesentlich zwischen der Matlab-Implementierung und der Python-Implementierung. Da diese Matlab-Funktion, wie die meisten anderen auch, nicht quelloffen ist, konnte bei der Implementierung auf diese Unterschiede nicht näher eingegangen werden.

Darüber hinaus spielt bei der Implementierung und den daraus erzeugten Ergebnissen die Wahl der Parameter eine entscheidende Rolle. Bei [Zintl, 2021] wurden diese perfekt auf die Punktwolken der Arcisstraße abgestimmt, während diese bei der hier entwickelten Implementierung für unterschiedliche Punktwolken gleichermaßen funktionieren müssen. Wie am Kapitelanfang bereits angedeutet, können bei individueller Wahl der Parameter je nach Punktwolke durchaus bessere Ergebnisse erzielt werden. Hierbei kommt allerdings ein weiterer elementarer Unterschied zwischen dieser Masterarbeit und der Bachelorarbeit zum Tragen: Der Fokus dieser Masterarbeit liegt auf der Automatisierung und dem generellen Ablauf von der Punktwolke bis zum Baumkaster in CityGML in unterschiedlichen Gebieten und nicht auf dem Erzielen von bestmöglichen Ergebnissen.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Bachelorarbeit im Vergleich zu den hier gewonnen Ergebnissen fallen teilweise deutliche Unterschiede auf. Darauf wird an den entsprechenden Stellen in der Evaluierung noch näher eingegangen und ist unter Berücksichtigung der zuvor aufgezeigten unterschiedlichen Bedingungen absehbar.

## 5.8 Vergleich zwischen urbanem Park und Straßenzug

Ein urbaner Park stellt im Vergleich zu einem Straßenzug meist ein flächiges Gebiet mit unterschiedlicher Flora und Fauna dar. Ein Straßenzug ist im Normalfall ein schmales langgestrecktes

Gebiet mit klar strukturiertem einheitlichem Begleitgrün. Im Falle von Bäumen als Begleitgrün wird an einer Straße meistens dieselbe Baumart eingesetzt. So wachsen zum Beispiel in der Arcisstraße lediglich Rosskastanien. In einem Park werden im Vergleich dazu oft viele verschiedene Baumarten nebeneinander eingesetzt. So stellt ein Park zur Aufnahme in ein Baumkataster ein unübersichtlicheres Gelände als ein Straßenzug mit Bäumen dar. Dies kann sowohl die manuelle Dendrometrie, als auch die Aufnahme mit Laserscannern erschweren und zeigt sich auch an den Detektionsergebnissen in Kapitel 5.3. Darüber hinaus eignen sich für die beiden Gebiete unterschiedliche Aufnahmemethoden. Für die Aufnahme der Bäume an der Straße ist insbesondere MLS sehr gut geeignet, da durch den auf einem Fahrzeug montierten Laserscanner eine einfache und schnelle Erfassung des Straßenraums möglich ist. Dagegen ist dieses Verfahren nur bedingt für Parks einsetzbar, da diese oft nicht mit dem Auto befahrbar sind. So wurde zum Beispiel im Fall des Pasinger Klostersgartens ein personengetragenes Laserscanningsystem eingesetzt.

## 5.9 Vergleich zur manuellen Erstellung eines Baumkatasters

Zur manuellen Vermessung von Bäumen werden zwei Personen benötigt, während die Aufnahme von Punktwolken und die anschließende Auswertung mit der vorgestellten Methodik von einer Person bewerkstelligt werden können. Darüber hinaus wird für die manuelle Erfassung aller Bäume in einem Gebiet wie der Arcisstraße etwa ein Arbeitstag benötigt, während die reine Erfassung mit MLS wenige Minuten dauert. Hinzu kommt in beiden Fällen noch die Vorbereitungszeit und etwaige Anfahrtszeiten. Des Weiteren benötigt die Auswertung der manuellen Messungen länger, als die Auswertung der Punktwolken mit dem entwickelten Programm, da es sich bei der manuellen Vermessung um mehrere unterschiedliche Messmethoden und Ergebnisse handelt. Die Punktwolken können im Vergleich dazu, nach dem sie gegebenenfalls vorverarbeitet und georeferenziert wurden, direkt in das Programm eingegeben werden. Je nach Gebiet liegen anschließend die fertigen Baumparameter und CityGML-Modelle in wenigen Minuten vor. Im Falle des größten Gebiets hat sich bei den hier durchgeführten Tests eine Laufzeit von 15 min ergeben (vgl. Abbildung 5.15 und Kapitel 5.6). Somit ist der Arbeits-, Zeit- und Personalaufwand bei der hier vorgestellten automatisierten Generierung eines Baumkatasters im Vergleich zur manuellen Erstellung eines Baumkatasters deutlich geringer, wodurch auch die Kosten in diesen Bereichen wesentlich gesenkt werden können.

---

## 6 Evaluierung

---

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Kapitel analysiert und bewertet. Hierzu werden diese soweit möglich mit den manuellen Referenzmessungen in der Arcisstraße aus den Jahren 2021 und 2023 (vgl. Kapitel 4.1.2) verglichen und eine Genauigkeitseinschätzung getroffen. Für den Pasinger Klostergarten liegen keine Referenzmessungen vor, weshalb zu diesem Gebiet eine Evaluierung nur eingeschränkt möglich ist. Zusätzlich dienen insbesondere die Genauigkeitsanforderungen der Leistungsbeschreibung zur vermessungstechnischen Straßenbefahrung der Stadt München [Landeshauptstadt München, 2023] als Genauigkeitsziel, da sie durch die Aktualität des Projekts eine geeignete Orientierung bieten. Außerdem sollen äquivalent zu der hier entwickelten Methodik die Baumparameter aus MLS-Punktwolken ermittelt werden, sodass die Genauigkeitsanforderungen passend zum Aufnahmeverfahren definiert sind.

Als Nummerierungssystem der Bäume wird das System der Referenzmessung 2023 (vgl. Abbildung 6.3 und 6.4) verwendet, da aus der Baumnummerierung direkt auf den Standort des Baums geschlossen werden kann. Die Bäume mit den Nummern 704 und 705 kommen in der Auswertung nicht vor, da Baum Nummer 704 seit mindestens 2016 fehlt und Baum Nummer 705 erst nach 2021 neu gepflanzt wurde. Des Weiteren wurde Baum Nummer 607 zwischen 2018, als die Punktwolke aufgenommen wurde und 2021, als die Referenzmessung durchgeführt wurde, gefällt. An seiner Stelle wurde vor 2021 ein neuer Baum gepflanzt. Da es sich nicht um ein und denselben Baum handelt, wird dieser Baum aus den Ergebnisbewertungen der Baumparameter ausgeschlossen. Für die Bäume 901, 902 und 904 liegen lediglich Referenzwerte für den BHD aus der Messung im Jahr 2023 vor. Daher werden diese Bäume nur in Abschnitt 6.3 entsprechend mit einbezogen. Darüber hinaus werden nur Bäume, die vom Programm automatisiert detektiert wurden beachtet, weshalb jeweils noch weitere Bäume in den Ergebnissen und damit auch in der Evaluierung fehlen.

### 6.1 Detektierte Bäume

In Kapitel 5.3 wurden die Anzahl der detektierten Bäume bereits auf Vollständigkeit und Korrektheit hin untersucht, um den jeweils passenden *num\_peaks*-Wert für die weitere Ergebnisbetrach-

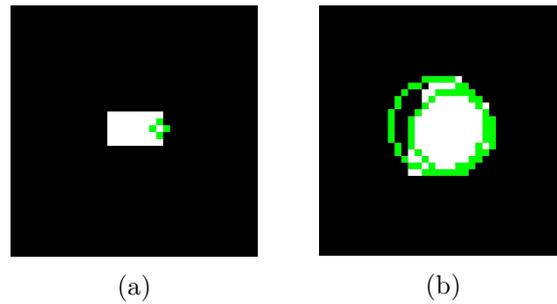


Abbildung 6.1: Detektierte Kreise der Hough-Transformation für Baum Nummer 902 im a BHD-Binärbild und im b Stamm-Binärbild.

tung zu definieren. Dabei hat sich für die Arcisstraße für den *num\_peaks*-Wert 10 das Ergebnis in Abbildung 5.10 ergeben. Es wurden insgesamt 21 Bäume erfasst, von denen 18 richtig und 3 falsch detektiert wurden. Bei näherer Betrachtung der falsch erkannten Bäume Nummer 0, 3 und 8 fällt auf, dass es sich dabei um Ampel- beziehungsweise Strommasten handelt. Diese erscheinen genauso wie Baumstämme als Kreise in den Binärbildern und wurden daher fälschlicherweise als Baum klassifiziert. Auch die Verifikationskriterien aus Kapitel 3.3.4 konnten diese Objekte nicht aussortieren. Bei näherer Betrachtung der zugehörigen Baumparameter in Tabelle G.3 weisen die drei falsch detektierten Bäume in der Baumhöhe und dem Stammdurchmesser keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu den richtig erkannten Bäumen auf. Lediglich der Kronendurchmesser von jeweils nur 1 m ist auffällig. An dieser Stelle setzen auch die Kriterien zum Aussortieren von Baumobjekten von Zintl [2021] an. Er entfernt Bäume aufgrund ihrer Kroneneigenschaften und Größen, während bei den hier verwendeten Kriterien nach [Hurst & Geiger, 2020] alle Baumparameter mit einbezogen werden. Die Kronenkriterien von [Zintl, 2021] führen im Fall der Arcisstraße zu einem besseren Detektionsergebnis. In anderen Gebieten in denen zum Beispiel überwiegend schmale Bäume wie Pappeln oder sehr junge Bäume wachsen, können diese allerdings auch dazu führen, dass Bäume fälschlicherweise aussortiert werden. Darüber hinaus können auch Bäume mit Kronenschaden oder frisch zurückgeschnittene Bäume eine sehr kleine Baumkrone haben. Außerdem werden auch Laternenmasten unterhalb von Bäumen fälschlicherweise als Bäume erkannt, wie es zum Beispiel bei Baum Nummer 7 oder 8 im Ergebnisbild der Arcisstraße Nord (Abbildung 5.11) der Fall ist. Beispielsweise hat der Laternenmast an Position 8 durch das Blätterdach über ihm mit 7 m (vgl. Tabelle G.1) einen normalen Baumkronendurchmesser in den Ergebnissen. Somit kann allein anhand der Baumparameter keine zuverlässige Aussage darüber getroffen werden, ob es sich bei dem detektierten Objekt um einen Baum handelt oder nicht. Um dem entgegen zu wirken, könnte zum Beispiel im Fall der Aktualisierung eines Baumkatasters Vorwissen über die Baumstandorte eingesetzt werden, um die Korrektheit der Detektierung der Bäume zu erhöhen. Dies wird auch in der Methodik in Kapitel 3.3 vorgesehen.

Im Gebiet der Arcisstraße Süd gibt es insgesamt 23 Bäume (vgl. Abbildung 5.6a). Bei der Detektion der Bäume wird allerdings lediglich eine maximale Vollständigkeit von 95,7%, was 22 Bäumen entspricht, erreicht. Der 23. Baum wird nicht erkannt, da die von der Hough-Transformation in beiden Binärbildern detektierten Kreise für diesen Baumstamm sich im Rahmen der gewählten Parameter nicht ähnlich genug sind. Der BHD des Baumes Nummer 902 ist mit 19 cm vergleichsweise klein (vgl. Referenzdaten 2023 Tabelle E.1). Darüber hinaus ist das Messfahrzeug an der Kreuzung Arcisstraße / Gabelsbergerstraße in die Gabelsbergerstraße abgebogen, wodurch Baum Nummer 902 lediglich von der Kreuzung aus im Abbiegevorgang erfasst wurde. Eine direkte Vorbeifahrt hat nicht stattgefunden. Dadurch wurde der Baum mit einer geringeren Punktzahl und Punktdichte in der resultierenden Punktwolke abgebildet. Dies führt wiederum dazu, dass der Baumstamm sich nur mit wenigen Pixeln in den Binärbildern abzeichnet. Insbesondere im BHD-Binärbild zeigt sich dieser Effekt, welches aus einer geringeren Schichtdicke als das Stamm-Binärbild erstellt wurde. So wird der Kreis im BHD-Binärbild von der Hough-Transformation deutlich unterschätzt, wodurch beim Vergleich der detektierten Kreise zwischen den Binärbildern dieser Kreis aussortiert und der Baum nicht erkannt wird. Die jeweils in den beiden Binärbildern detektierten Kreise zeigt Abbildung 6.1 vergleichend.

Dasselbe Prinzip trifft bei den nicht erkannten Bäumen in den weiter von der Straße entfernten Baumreihen der Arcisstraße Nord zu. In den vorderen drei Reihen werden bei entsprechendem *num\_peaks*-Wert mehr Bäume erkannt, während in den Reihen 4 bis 6 immer weniger Bäume detektiert werden. Somit nimmt die Vollständigkeit der Baumerkennung mit zunehmendem Abstand zum Messfahrzeug ab. Darüber hinaus sind die Bäume in der am weitesten entfernten Reihe zur Straße im unteren Bereich mit Gebüsch bewachsen, was die Detektion erschwert. Genauso wie im Ergebnisbild der Arcisstraße Süd sind im Ergebnisbild der Arcisstraße Nord (Abbildung 5.11) Ampel- beziehungsweise Laternenmasten zu erkennen, die als Bäume deklariert wurden. Dies trifft zum Beispiel auf die Bäume Nummer 0, 5, 10 und 14 zu.

In der Leistungsbeschreibung der Stadt München [Landeshauptstadt München, 2023] wird eine Vollständigkeit sowie Korrektheit hinsichtlich der Detektion von Baumstandorten im Umkreis von 25 m vom Aufnahmestandort von jeweils 95% gefordert. Für die Testgebiete Arcisstraße Süd und Nord ist in Abbildung 6.2 exemplarisch ein Umkreis von 25 m um zwei Standpunkte auf der Straße eingezeichnet. Hierbei zeigt sich, dass in dieser Definition nur die ersten beiden Baumreihen inbegriffen sind. Werden nur die ersten beiden Baumreihen der Arcisstraße Nord beachtet, ergibt sich für dieses Gebiet eine Vollständigkeit von 81,8%. Somit werden in keinem der Testgebiete mit dem gewählten Parametersatz die Anforderungen aus [Landeshauptstadt München, 2023] erfüllt.

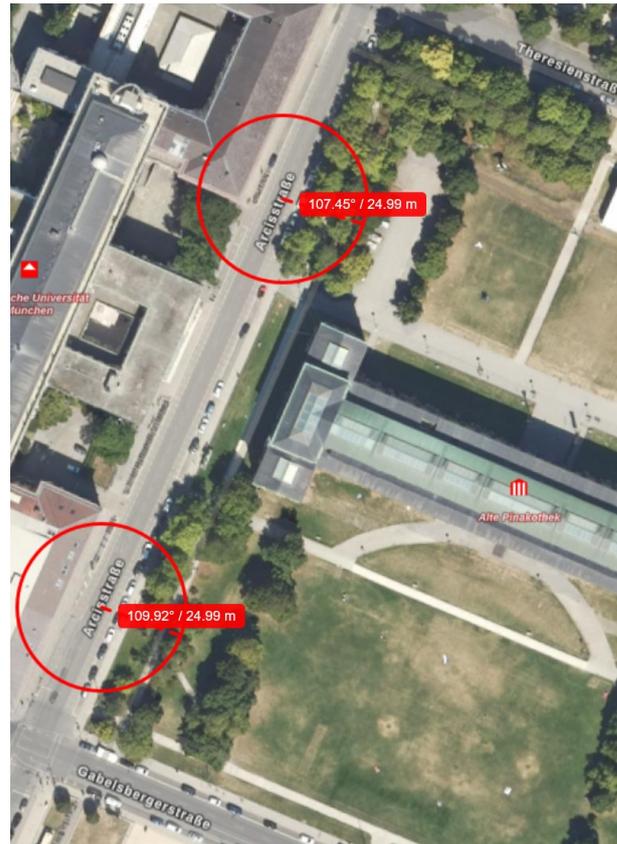


Abbildung 6.2: Exemplarische 25 m Umkreise um zwei Aufnahmepunkte in der Arcisstraße. Hintergrund: Luftbild [Bayerische Vermessungsverwaltung, 2023a].

Im Vergleich zu [Zintl, 2021] sind die Werte um 20 bis 30% schlechter, aufgrund der Unterschiede, welche in Kapitel 5.7 dargelegt werden. Rutzinger et al. [2011] nutzen ein zur Arcisstraße vergleichbares Testgebiet mit insgesamt 38 Bäumen. Sie erreichen eine Vollständigkeit von 86% und eine Korrektheit von 93%. Dabei haben sie ebenfalls Probleme mit Straßenlampen, welche als Bäume erkannt werden. Im Vergleich zu diesen Ergebnissen schneidet die hier angewendete Detektion ebenfalls etwas schlechter ab: Im Fall der Arcisstraße Süd um 8% bei der Vollständigkeit und um 7% bei der Korrektheit. Aus dieser Veröffentlichung ist nicht nachvollziehbar wie die Bäume aus der Punktwolke segmentiert wurden, allerdings ist davon auszugehen, dass ähnlich wie bei [Zintl, 2021] diese zugeschnitten auf die entsprechende Punktwolke stattgefunden hat. Im Fall der hier entwickelten Methodik war im Gegensatz dazu das Ziel, automatisiert möglichst gute Ergebnisse für unterschiedliche Punktwolken zu erzielen, die mit unterschiedlichen Sensoren in unterschiedlichen Gebieten aufgenommen wurden. Daher ist es nicht überraschend, dass sich im Vergleich zu auf die Punktwolken zugeschnittenen Programmen schlechtere Ergebnisse ergeben. Mit einem auf die jeweilige Punktwolke zugeschnittenen Parametersatz können durchaus deutlich bessere Detektionsergebnisse erzielt werden.

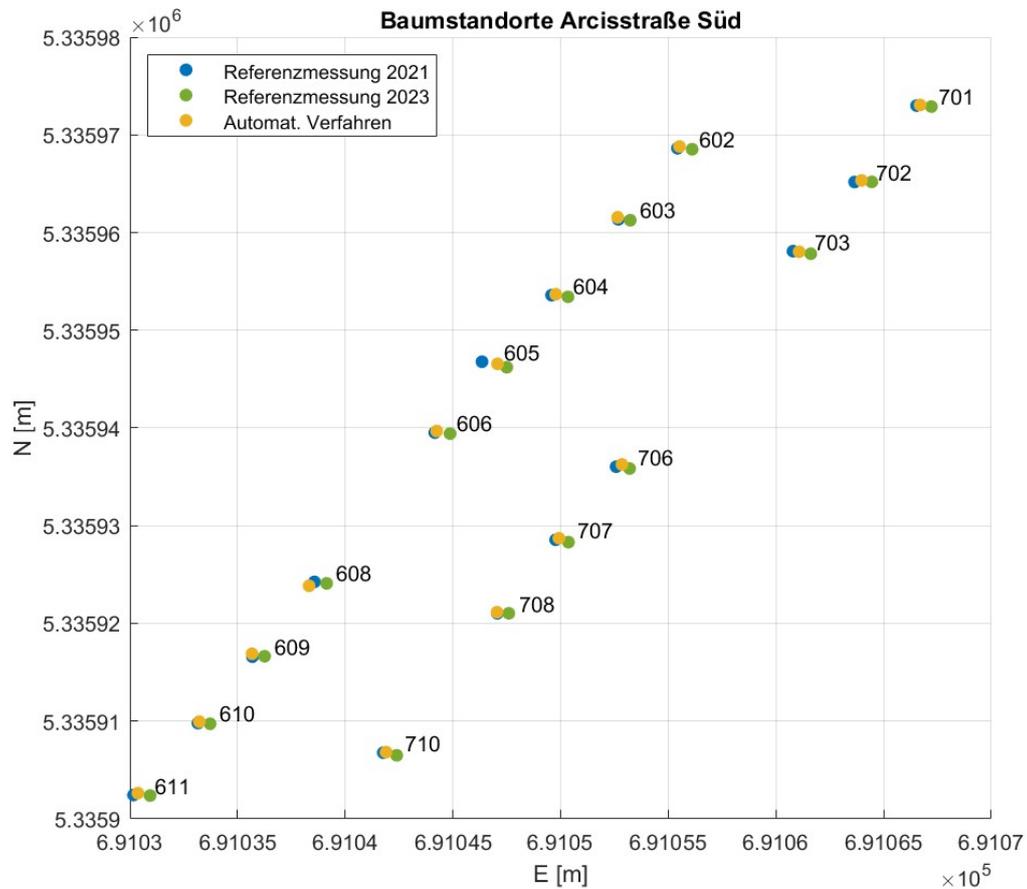


Abbildung 6.3: Plot der Baumstandorte der Referenzmessungen 2021 und 2023 sowie der Ergebnisse des automatisierten Verfahrens in der Arcisstraße Süd.

## 6.2 Baumstandorte

Die beiden Abbildungen 6.3 und 6.4 zeigen die Baumstandorte der detektierten Bäume aus dem automatisierten Verfahren im Vergleich zu den Referenzmessungen 2021 und 2023. Dabei zeigt sich ein größerer systematischer Versatz von etwa 0,5 m in östlicher Richtung in der Referenzmessung von 2023 im Vergleich zur Referenzmessung von 2021. Dies liegt daran, dass die Baumstandorte 2021 aus der Punktwolke selbst abgeleitet wurden und nicht mit einem Tachymeter eingemessen wurden (vgl. Kapitel 4.1.2). Dadurch liegt die Genauigkeit der Positionsbestimmungen 2021 bei etwa 10 cm bis 50 cm. Darüber hinaus weist die verwendete Punktwolke eine relativ schlechte Georeferenzierung auf, welche Abweichungen bis zu 0,5 m beinhaltet. Dies wurde vor allem durch ungünstige Abschattungsverhältnisse bei der Datenaufnahme verursacht [PR Hirt, Persönliche Kommunikation, 02.06.2023]. Daher werden die automatisch detektierten Baumstandorte lediglich mit der Referenzmessung aus dem Jahr 2021 evaluiert, um die Genauigkeit der Detektion ohne Einfluss der Genauigkeit der Georeferenzierung zu bewerten.

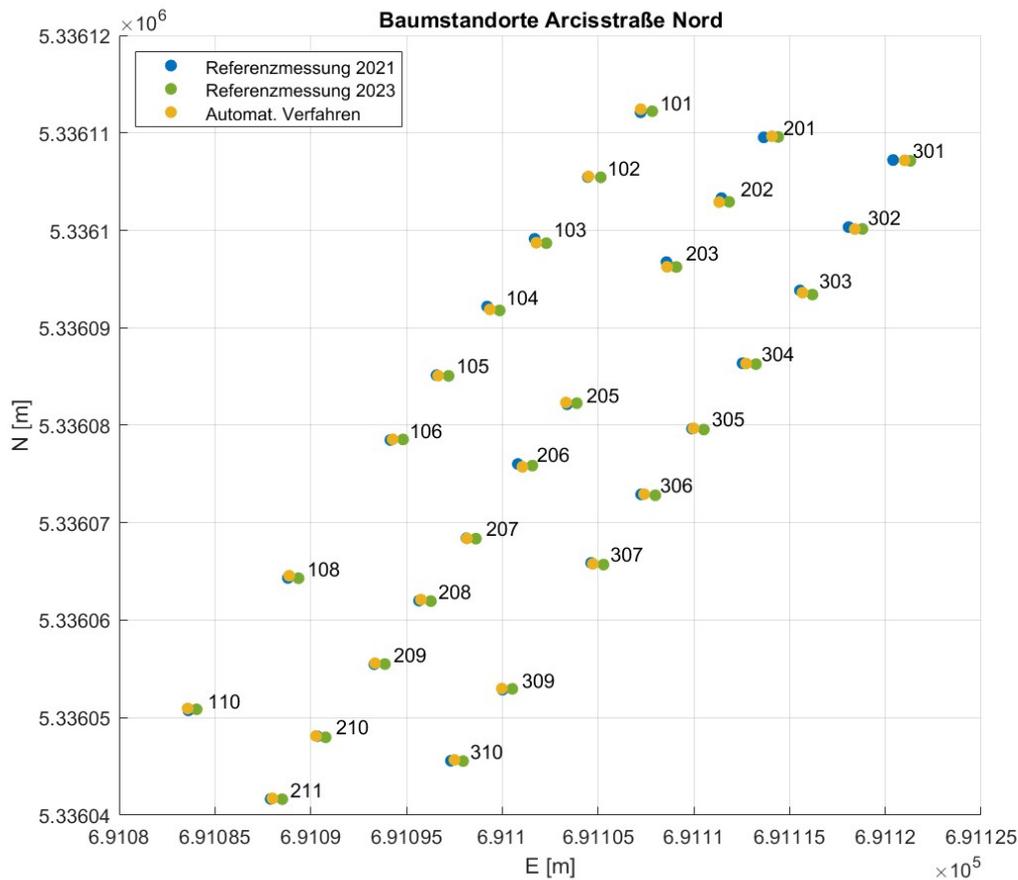


Abbildung 6.4: Plot der Baumstandorte der Referenzmessungen 2021 und 2023 sowie der Ergebnisse des automatisierten Verfahrens in der Arcisstraße Nord.

Hierzu zeigen die beiden Plots 6.5 und 6.6 die Lageabweichungen der automatisch ermittelten Baumstandorte von der Referenz aus 2021. In der Arcisstraße Süd liegt die höchste Abweichung bei 57 cm für Baum Nummer 605, während die geringste Abweichung bei 1 cm für Baum Nummer 708 liegt. Insgesamt ergibt sich eine mittlere Abweichung von 10 cm in der Arcisstraße Süd. In der Arcisstraße Nord bewegen sich die Lageabweichungen in einem ähnlichen Größenspektrum. Hier liegt die mittlere Abweichung bei 7 cm, die höchste für Baum Nummer 301 bei 36 cm und die geringste für mehrere Bäume bei 0 cm. Die Höhenabweichung von der Referenzmessung liegt im gesamten Gebiet Arcisstraße im Mittel bei 25 cm und ist damit ungenauer als die Lage. Dies ist ebenfalls auf die ungenau bestimmten Referenzwerte zurückzuführen. Für ein Baumkataster spielt allerdings auch die Höhengenaugkeit im Vergleich zur Lagegenauigkeit eine untergeordnete Rolle. Unter der Berücksichtigung einer Pixelgröße von 2,5 cm in den beiden Gebieten und der Tatsache, dass die Referenzpositionen 2021 nicht mit einem Tachymeter, sondern manuell in der Punktwolke relativ ungenau ermittelt wurden, ist das Ergebnis im Kontext eines Baumkatasters als gut zu bewerten.

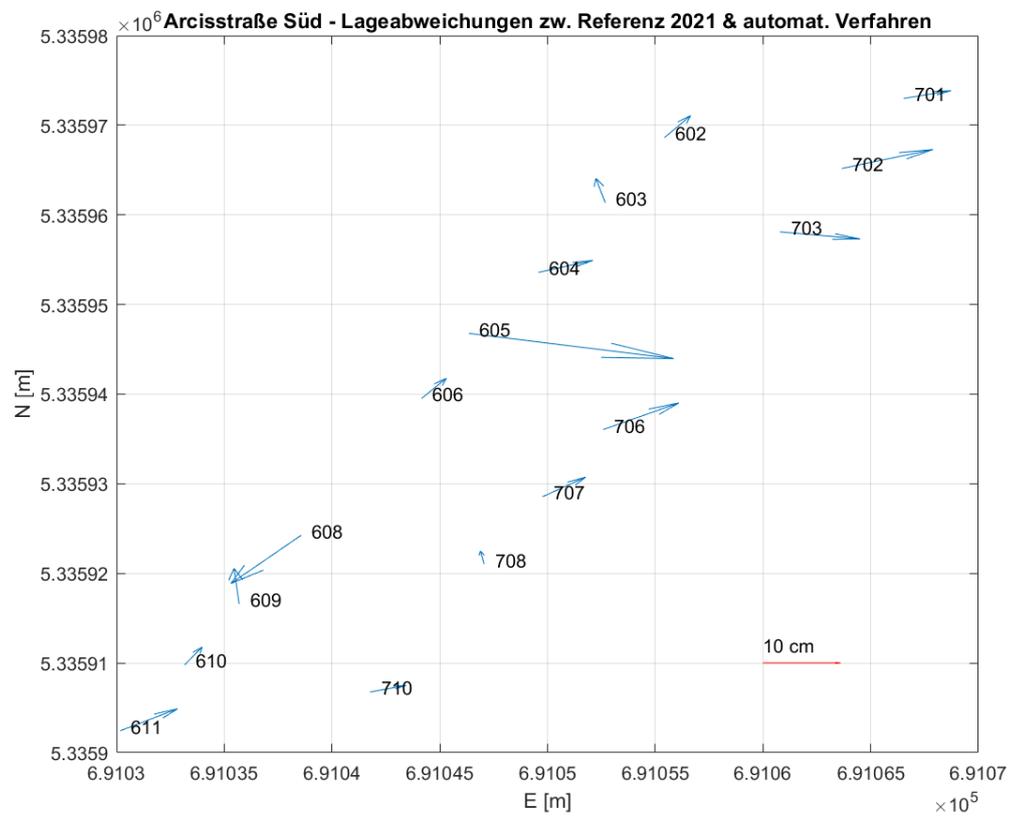


Abbildung 6.5: Plot der Lageabweichung der Ergebnisse des automatisierten Verfahrens von den Referenzmesswerten 2021 in der Arcisstraße Süd.

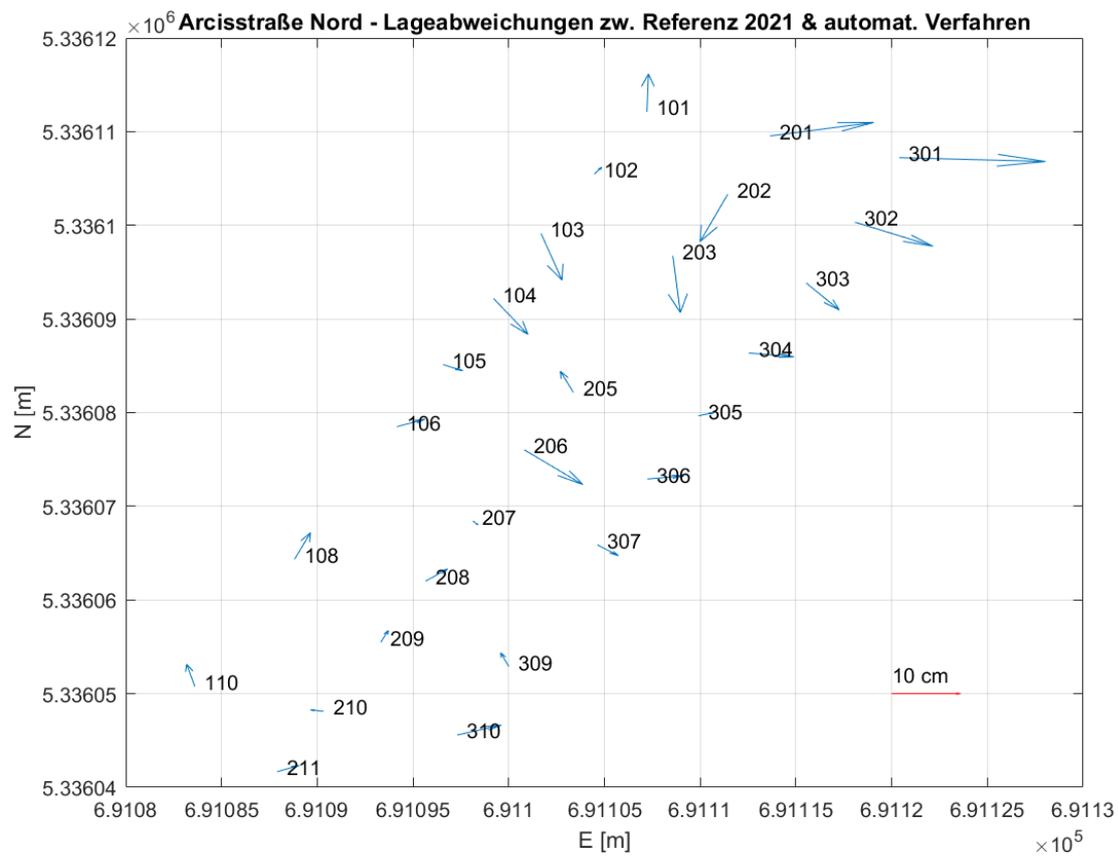


Abbildung 6.6: Plot der Lageabweichung der Ergebnisse des automatisierten Verfahrens von den Referenzmesswerten 2021 in der Arcisstraße Nord.



Abbildung 6.7: Differenz zwischen der BHD-Referenzmessung 2023 und 2021 in der Arcisstraße.

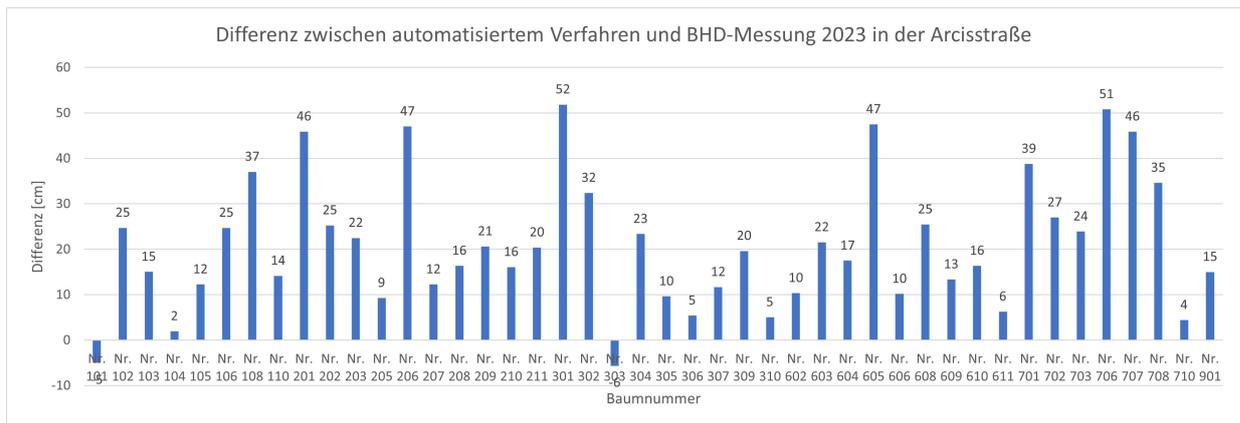


Abbildung 6.8: Differenz zwischen dem Ergebnis des automatisierten Verfahrens und der BHD-Referenzmessung 2023 in der Arcisstraße.

### 6.3 Brusthöhendurchmesser (BHD)

Abbildung 6.7 zeigt die Differenzen zwischen den BHD-Referenzmessungen 2023 und 2021. Dabei fallen einzelne Ausreißer mit Differenzen von 4 oder 5 cm auf. Diese lassen sich mit den teilweise unterschiedlichen Verfahren zur BHD-Bestimmung erklären. Während im Jahr 2023 alle Bäume mit einem Maßband eingemessen wurden, wurden im Jahr 2021 manche BHD durch orthogonale Messungen mit dem Meterstab bestimmt (vgl. Kapitel 4.1.2), was zu ungenaueren Messwerten führt. Daher werden für die Evaluierung der BHD-Ergebnisse lediglich die Referenzwerte aus 2023 verwendet. Die Differenzen zwischen den automatisch aus der Punktwolke extrahierten BHD-Werten und den Referenzwerten aus 2023 zeigt das Balkendiagramm in Abbildung 6.8. Dabei bewegen sich die Abweichungen im Bereich von 2 bis 52 cm.

In der Arcisstraße wachsen Rosskastanien, welche nach [Rötzer et al., 2021] etwa 1 cm pro Jahr an BHD-Zuwachs haben. Dieser hängt allerdings stark vom Alter der Bäume ab und kann bei jungen Bäumen deutlich größer und bei älteren Bäumen deutlich geringer ausfallen. Daher können die großen Differenzen allein durch den Zuwachs innerhalb der 5 Jahre zwischen 2018 und 2023 nicht erklärt werden. Die großen Abweichungen resultieren vielmehr aus der Hough-Transformation,

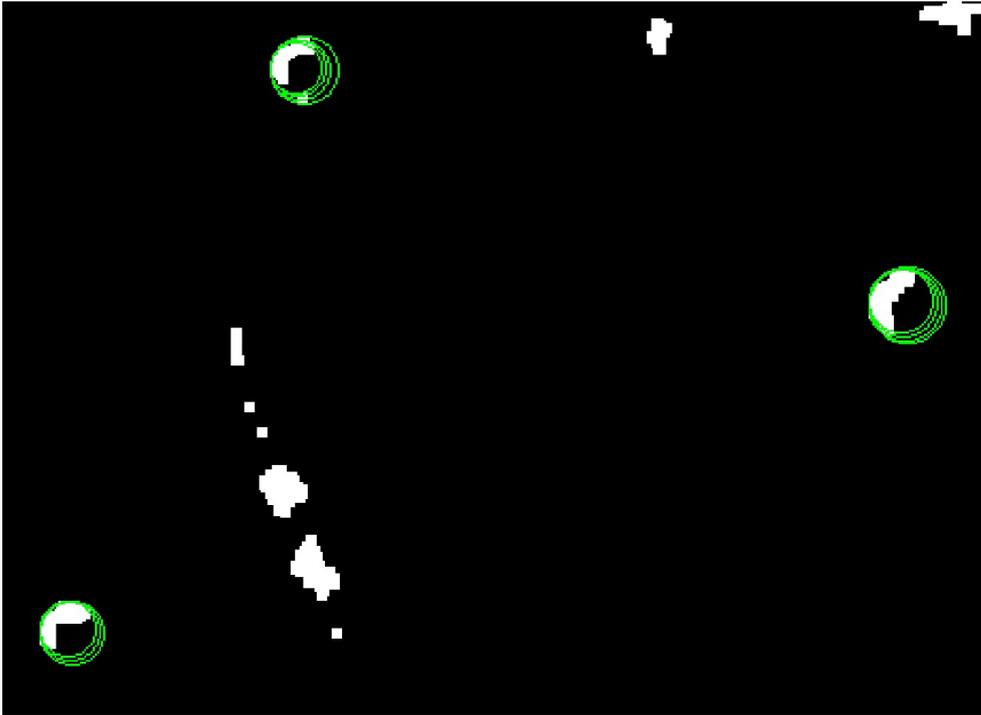


Abbildung 6.9: Von der Hough-Transformation detektierte Kreise im BHD-Binärbild.

welche die Kreise der Baumstämme in den Binärbildern in manchen Fällen zu groß detektiert. Dies liegt daran, dass die Baumstämme mit Laserscannern aufgenommen wurden und somit alle Punkte auf der Außenseite des Baums auftreffen. Dabei ergeben sich nicht nur direkt am Stamm liegende Punkte, sondern durch Streuung auch Punkte im unmittelbaren Umkreis der Baumstämme. Bei der Reduktion in die Binärbilder reicht ein Punkt aus, um ein Pixel weiß zu färben, wobei in diesem Fall ein Pixel 2,5 cm entspricht. Deshalb werden die Baumstämme in den Binärbildern mit einem zu großem Durchmesser abgebildet. Darüber hinaus bewirkt der Parameter *normalize* der Hough-Transformation, dass der Akkumulator mit dem Radius normalisiert wird und zudem die Kreise nach absteigendem Radius sortiert werden. Daraus folgt, dass die Bäume mit ihren Parametern nach absteigendem BHD sortiert in einem Array vorliegen, bevor sie nach den in Kapitel 3.3.4 beschriebenen Kriterien aussortiert werden. Dabei werden Kreise, die zu eng beieinander liegen, entfernt und durch die Sortierung des Arrays wird jeweils der Kreis mit dem größten Radius behalten. Dies wirkt sich ungünstig auf das BHD-Ergebnis aus und es sollte ein weiteres Kriterium eingeführt werden, welches dieses Verhalten verbessert. Abbildung 6.9 zeigt exemplarisch für drei Baumstämme die von der Hough-Transformation gefundenen Kreise im BHD-Binärbild, wobei deutlich wird, dass der größte Kreis nicht der bestpassendste ist.

Durch diese ungünstige Implementierung lässt sich das Potential der Methodik für die BHD-Bestimmung nicht gut bewerten. Ein Vergleich zu den Ergebnissen aus [Zintl, 2021] zeigt, dass

diese ebenfalls recht große Abweichungen von bis zu 42 cm aufweisen. Zintl [2021] erklärt diese durch Ungenauigkeiten bei der Aufnahme durch MLS-Systeme und zudem ebenfalls durch die Wahl der Pixelgröße von 2,5 cm. Außerdem hat er mehrere größere Abweichungen im negativen Bereich, welche durch von der Hough-Transformation zu klein detektierten Kreisen verursacht werden. Dies tritt in diesem Fall durch die Sortierung nicht auf. Die geforderte Genauigkeit von 5 cm aus der Leistungsbeschreibung der Stadt München [Landeshauptstadt München, 2023] können nur in 11% der Fälle eingehalten werden.

## 6.4 Baumhöhen

Für die Baumhöhen liegen lediglich die Referenzmessungen aus 2021 vor, da die Höhenmessungen aus 2023 zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit noch nicht ausgewertet sind. Diagramm 6.10 zeigt die Differenzen zwischen den automatisiert ermittelten Höhen und den Referenzhöhen aus 2021. Dabei fällt Baum Nummer 102 mit einer sehr großen Abweichung von 9 m auf. Bei diesem Baum handelt es sich um einen vergleichsweise kleinen Baum mit einer tatsächlichen Höhe von 7 m und einer kleinen Baumkrone. Im Grauwertbild überschneidet sich seine kleine Baumkrone mit der des benachbarten Baumes (vgl. Abbildung 5.11), welcher mit 14 m viel größer ist. Da zur Ermittlung der Baumhöhe das Pixel des Grauwertbilds innerhalb der ermittelten Baumkrone mit dem größten Grauwert dient, wird durch die Überlappung der Baumkronen dem kleinen Baum ein Höhenwert aus der benachbarten Baumkrone zugeordnet, wodurch sich in den Ergebnissen eine viel zu hohe Baumhöhe für Baum Nummer 102 ergibt.

Alle anderen absoluten Abweichungen bewegen sich in einem Bereich von 1 m bis maximal 2 m mit einer Standardabweichung von 77 cm. Nach den Angaben in [Rötzer et al., 2021] wächst eine Rosskastanie in 10 Jahren 1 m bis 2,2 m. Da es sich zwischen der Aufnahme der Punktwolke 2018 und der Aufnahme der Referenzmessungen 2021 um 3 Jahre handelt, können die negativen Abweichungen zum Großteil mit dem Wachstum erklärt werden. Hinzu kommen noch Abweichungen, die bei der Glättung des Grauwertbildes mit dem Medianfilter entstehen, sowie Messungenauigkeiten bei der Tachymetermessung durch Anzielschwierigkeiten und bei der Laserscannermessung durch Abschattung. Somit können die Genauigkeitsanforderungen aller in Kapitel 2.3.2 genannten Referenzen, und insbesondere der Leistungsbeschreibung der Stadt München [Landeshauptstadt München, 2023] nach einer Baumhöhenbestimmung in Abstufungsschritten von 1 m im Mittel, erfüllt werden. Darüber hinaus zeigen die hier gewonnenen Ergebnisse kleinere Differenzen zu den Referenzmessungen, als die Ergebnisse von Zintl [2021]. Dies liegt an der realitätsnäheren Bodenprozessierung. Während bei [Zintl, 2021] eine einheitliche Höhenbezugsfläche für alle Bäume

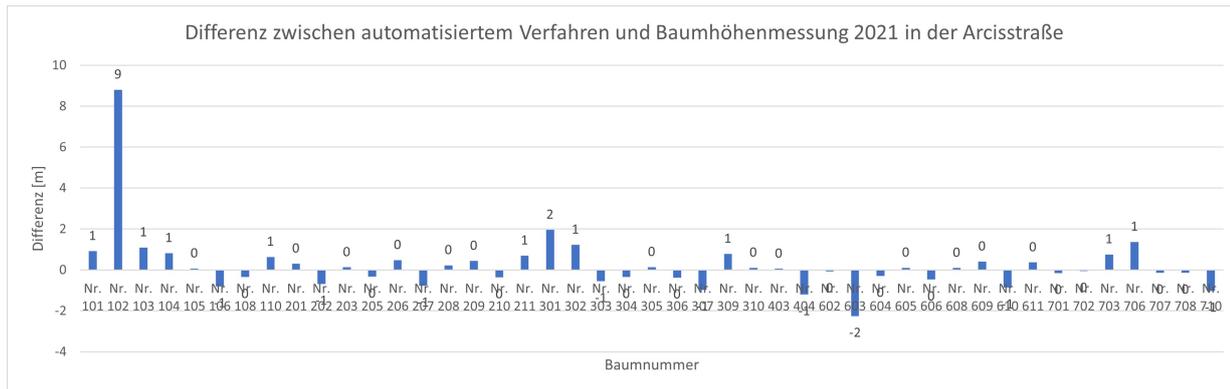


Abbildung 6.10: Differenz zwischen dem Ergebnis des automatisierten Verfahrens und der Baumhöhen-Referenzmessung 2021 in der Arcisstraße.

genutzt wurde und die Bodenpunkte mit einem einheitlichen z-Wert eliminiert wurden, wurden im Fall der hier entwickelten Methodik Geländehöhenunterschiede deutlich besser beachtet und mit einbezogen. Dadurch können die Baumhöhen genauer bestimmt werden, was vor allem in unebenerem Gelände als der Arcisstraße noch größere Auswirkungen hat.

## 6.5 Baumkronendurchmesser

Für die Evaluierung des Baumkronendurchmessers liegen für keines der Testgebiete Referenzwerte vor, weshalb nur eine optische Bewertung anhand der Ergebnisbilder 5.10, 5.11 und 5.12 möglich ist. Hierbei zeigt sich, dass die Baumkronen in den meisten Fällen mit optisch gut passender mittlerer Kronenausdehnung bestimmt werden. Insgesamt wird die Baumkrone eher zu klein als zu groß eingeschätzt, was auf der einen Seite ungünstige Auswirkungen auf spätere Simulationen mit dem 3D-Modell haben kann, zum Beispiel zur Abschätzung von Abschattungen oder Sichtverhältnissen. Auf der anderen Seite ist es für die Baumhöhenbestimmung von Vorteil, dass die Baumkronen vor allem in Überlappungsbereichen nicht zu groß bestimmt werden. Dies kann sonst leicht zu fehlerhaften Baumhöhen führen, wie es bei Baum Nummer 102 aufgetreten ist (vgl. Abschnitt 6.4). In der Leistungsbeschreibung der Stadt München [Landeshauptstadt München, 2023] wird eine Angabe des Kronendurchmessers lediglich in Abstufungsschritten von 2 m gef

---

## 7 Diskussion

---

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass es möglich ist, ein Baumkataster automatisiert aus Punktwolken in unterschiedlichen urbanen Umgebungen mit der vorgestellten Methodik zu generieren. Dabei hat sich allerdings auch herausgestellt, dass diese Fragestellung komplex ist und vor allem die einzelnen Punktwolken zu unterschiedlich sind, um einen universellen Parametersatz für jedes Gebiet zu verwenden und gleichzeitig ausreichend gute Ergebnisse zu erzielen. Um den Anforderungen eines Baumkatasters gerecht zu werden, müssen die Parameter der Punktwolke entsprechend aufeinander abgestimmt werden, was die Automatisierung einschränkt, da Nutzer-eingriffe nötig sind. Darüber hinaus ist das Programm nicht dafür geeignet von Laien bedient zu werden, da Fachwissen im Bereich Punktwolken nötig ist, um die Parameter entsprechend zu wählen. Insbesondere die Wahl des Parameters *num\_peaks* stellt aufgrund seines großen Wertebereichs eine Herausforderung dar. Um dem entgegenzuwirken, müsste die Methodik robuster gegen falsch Detektionen werden, was zum Beispiel durch Einbringen von Vorwissen über Baumstandorte möglich wäre. Darüber hinaus beeinflusst auch die Wahl der Pixelgröße der Binärbilder das Detektionsergebnis, wodurch eine Gittersuche notwendig wird, um die bestmögliche Kombination zu finden. Werden allerdings die Parameter optimal gesetzt, werden die extrahierten Parameter bis auf die BHD den Anforderungen eines Baumkatasters gerecht.

Um die BHD genauer bestimmen zu können, kommen mehrere Möglichkeiten infrage. Zum einen kann die Pixelgröße der Binärbilder verkleinert werden, wodurch eine präzisere Bestimmung der Kreisradien durch die Hough-Transformation ermöglicht wird. Auf der anderen Seite kann dies insbesondere bei geringer Punktdichte zu unzureichend abgebildeten Stämmen in den Binärbildern führen, wodurch die Detektionsergebnisse verschlechtert werden. Zum anderen können zur BHD-Bestimmung andere Ansätze gewählt werden, welche nicht auf Bildverarbeitung beruhen. Hierzu könnte zum Beispiel der in Kapitel 3.4 vorgestellte alternative Ansatz genutzt werden, welcher die Baumstämme aus der Punktwolke extrahiert und anschließend mit einem RANSAC unter Verwendung eines Zylindermodells die BHD der Bäume bestimmt. Dadurch beeinflussen die durch Streuung im unmittelbaren Umfeld der Baumstämme liegenden Punkte das Ergebnis nicht so stark. Bei der Erstellung der Binärbilder reicht ein Punkt aus, um ein Pixel weiß zu färben,

wodurch die Baumstämme in den Binärbildern dicker erscheinen. Dadurch werden zu große Kreise von der Hough-Transformation detektiert, was wiederum zu zu großen BHD-Werten führt. Dieser Effekt wird im Falle der hier verwendeten Implementierung zusätzlich durch eine ungünstige Sortierung der gefundenen Kreise verstärkt. Werden dagegen Zylinder mit Hilfe des RANSAC in die jeweiligen Punktwolkencluster der Baumstämme gefittet, umschließen diese nicht alle Stamm- punkte, sondern liegen ausgeglichen in der Punktwolke. Dadurch sollte sich ein präziseres Ergebnis für die jeweiligen BHD ergeben.

Weiterhin ist das vorgestellte Verfahren für Straßenzüge besser geeignet als für Parkanlagen. Dies liegt zum einen an der länglichen Ausdehnung der Straßenzüge, welche leicht und schnell mit MLS aufgenommen werden können. Lediglich für weiter von der Straße entfernt stehende oder abgeschattete Bäume kann es zu Schwierigkeiten bei der Detektion kommen. Im Vergleich dazu sind Parks oft nicht mit dem Auto befahrbar und haben eine flächenhafte oft unübersichtliche Ausdehnung. Hierbei muss auf langsamere Aufnahmemethoden wie TLS oder PLS zurückgegriffen werden. Darüber hinaus kommt es in Parks häufiger als an Straßen vor, dass Bäume in Gruppen stehen oder mit großem Gebüsch bewachsen sind. Diese Faktoren erschweren die Extrahierung von Baumparametern aus der Punktwolke und die entsprechenden Bäume müssen manuell aufgenommen werden.

Im Vergleich zu einem manuell erstellten Baumkataster hat das automatisierte Verfahren klare Vorteile im Hinblick auf Zeit, Arbeitsaufwand und Personalbedarf, wodurch auch die Kosten in diesen Bereichen gesenkt werden können. Auch die erzielten Genauigkeiten sind bis auf die BHD-Bestimmung für ein Baumkataster ausreichend und mit den Genauigkeiten herkömmlicher Methoden vergleichbar. Allerdings können mit einem automatisierten Verfahren lediglich die Stammdaten in einem Baumkataster für die Bäume ermittelt werden, welche die Grundlagen für die gesetzlich vorgeschriebenen Baumkontrollen sind. Diese Baumkontrollen zur Feststellung der Verkehrssicherheit der Bäume müssen weiterhin von Personen vor Ort durchgeführt werden und können nicht automatisiert werden. Die automatisierte Ermittlung der Stammdaten kann jedoch gerade bei der erstmaligen Erstellung eines Baumkatasters den Arbeitsaufwand deutlich reduzieren und als Planungsgrundlage für die notwendigen manuellen Untersuchungen dienen. Über ein gewöhnliches Baumkataster hinaus, werden im hier vorgestellten automatisierten Verfahren die Bäume direkt als 3D-Modelle im CityGML-Format ausgegeben, wodurch sich neue Anwendungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit einem 3D-Stadtmodell ergeben. So werden realitätsnahe Visualisierungen und Simulationen unter Einbeziehung der Stadtbäume ermöglicht und die Grundlage im Bereich der Vegetation für einen Digitalen Zwilling geschaffen.

---

## 8 Fazit und Ausblick

---

Die entwickelte Methodik hat gezeigt, dass es möglich ist, automatisiert aus Punktwolken ein Baumkataster in unterschiedlichen urbanen Umgebungen zu generieren und dabei effizienter zu sein als bei der herkömmlichen Erstellung eines Baumkatasters. Dabei lag der Fokus auf der Frage, inwiefern und wie weit dies möglich ist und nicht auf der Gewinnung bestmöglicher Ergebnisse. In diesem Punkt gibt es noch großes Potential für weitere Forschung und den Einsatz von alternativen Methoden und Algorithmen. Um mit der vorgestellten Methodik optimale Ergebnisse zu erzielen, müsste eine Gittersuche für die entscheidenden Parameter durchgeführt werden. Dies wurde in dieser Masterarbeit nicht umgesetzt, da es den zeitlichen Umfang überstiegen hätte. Zur Verbesserung der Höheninformationen, könnte in zukünftigen Arbeiten ein DGM genutzt werden. Darüber hinaus kann die Methodik noch erweitert werden, um weitere Baumattribute wie die Baumart, das Alter oder den Gesundheitszustand aus Punktwolken zu ermitteln. Ferner könnte die vorgestellte Methodik außerhalb des urbanen Raums in Forstgebieten zur Forstinventur eingesetzt werden, sowie durch Laserscanningaufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten beim Monitoring von Bäumen genutzt werden. Hierzu muss allerdings auch noch die Genauigkeit der extrahierten Baumparameter gesteigert werden, um Änderungen aufgrund des Wuchsverhaltens von Bäumen analysieren zu können.

Um die Datengrundlage und Detektion von Bäumen in Punktwolken zu verbessern, könnten Daten aus verschiedenen Erfassungssystemen kombiniert werden. Beispielsweise könnte ALS mit MLS kombiniert werden, um alle Bäume in einer Stadt zu erfassen, da mit MLS nur die Erfassung von Bäumen an Straßen möglich ist.

Für die dreidimensionale Modellierung der Bäume wird hier ein FME-Workflow genutzt, welcher den Nachteil hat, dass FME lizenzpflichtig ist. Dies könnte sich mit dem Erscheinen von zukünftigen CityGML Versionen und verbesserten Bedingungen zur Geometriemodellierung anders lösen lassen. Eine andere Möglichkeit wäre die Nutzung eines alternativen Datenformates zur Modellierung der Bäume und zudem könnten die Bäume in zukünftigen Arbeiten realitätsnaher modelliert werden.



---

# Literaturverzeichnis

---

- Armson D, Stringer P, Ennos AR (2012) The Effect of Tree Shade and Grass on Surface and Globe Temperatures in an Urban Area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11 (3): 245–255.
- Aschoff T, Thies M, Winterhalder D, Kretschmer U, Spiecker H (2004) Automatisierte Ableitung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten. Tagungsband der 24. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, : 341–348.
- Baumgarten H, Doobe G, Dujesiefken D, Jaskula P, Kowol T, Wohlers A (2004) Kommunale Baumkontrolle zur Verkehrssicherheit: Der Leitfaden für den Baumkontrolleur auf der Basis der Hamburger Baumkontrolle. Braunschweig: Thalacker Medien.
- Bayerische Vermessungsverwaltung (2023a) Bayerische Vermessungsverwaltung: Bayern Atlas. <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas>. Aufgerufen am: 25.02.2023.
- Bayerische Vermessungsverwaltung (2023b) Open Data - Hinweis zur Datenabgabe - 3D-Gebäudemodell LoD2. [https://geodaten.bayern.de/odd/m/3/pdf/hinweise\\_daten\\_lod2\\_download.pdf](https://geodaten.bayern.de/odd/m/3/pdf/hinweise_daten_lod2_download.pdf).
- Bayerische Vermessungsverwaltung (2023c) OpenData - Kostenfreie Geodaten der Bayerischen Vermessungsverwaltung: 3D-Gebäudemodelle (LoD2). <https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=lod2>. Aufgerufen am: 12.04.2023.
- Beil C, Kutzner T, Schwab B, Willenborg B, Gawronski A, Kolbe TH (2021) Integration of 3D Point Clouds With Semantic 3D City Models – Providing Semantic Information Beyond Classification. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, VIII-4/W2-2021: 105–112.
- Bienert A, Scheller S, Keane E, Mullooly G, Mohan F (2007) Automatische Erfassung forstinventur-relevanter Geometrieparameter von Waldbäumen aus terrestrischen Laserscannerdaten. In: Luhmann T, Müller C (eds) *Photogrammetrie - Laserscanning - optische 3D-Messtechnik*. Heidelberg: Wichmann.
- Brolly G, Király G, Lehtomäki M, Liang X (2021) Voxel-Based Automatic Tree Detection and Parameter Retrieval from Terrestrial Laser Scans for Plot-Wise Forest Inventory. *Remote Sensing*, 13 (4): 542.
- BUND (2021) BUND Naturschutz in Bayern e.V.: Pressemitteilung: Grüne Oase in der Stadt. [https://www.bund-naturschutz.de/fileadmin/Bilder\\_und\\_Dokumente/Presse\\_und\\_Aktuelles/2021/Natur\\_und\\_Landschaft/PM\\_Magdalenenpark06102021.pdf](https://www.bund-naturschutz.de/fileadmin/Bilder_und_Dokumente/Presse_und_Aktuelles/2021/Natur_und_Landschaft/PM_Magdalenenpark06102021.pdf).

- Canny J (1986) A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8 (6): 679–698.
- Duda RO, Hart PE (1972) Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Communications of the ACM*, 15 (1): 11–15.
- Dudenredaktion (o.J.) „Dendrometrie“ auf Duden online. <https://www.duden.de/node/31416/revision/1437187>. Aufgerufen am: 09.04.2023.
- Forestry Tools (2023) Professional Tree Planting, Pruning and Measuring Equipment. <https://www.forestrytools.com.au>.
- GALK (2005) Leitfaden für den Aufbau und die Fortschreibung eines digitalen Baumkatasters. <https://baumkataster.galk.de/>. Aufgerufen am: 15.03.2023.
- Geiger A, Hurst J (2022) GitHub: KIT-IAI/Tree3D. <https://github.com/KIT-IAI/Tree3D>. Aufgerufen am: 17.02.2023.
- Goebel M, Schmidt J, Iwaszczuk D (2023) Digitalisierung des Waldes mithilfe von Laserscanner und Mobile Mapping. In: Weinold T (ed) 22. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2023: 168–177.
- Gollob C, Ritter T, Nothdurft A (2020) Forest Inventory with Long Range and High-Speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Technology. *Remote Sensing*, 12 (9): 1509.
- Gregoire TG, Zedaker SM, Nicholas NS (1990) Modeling Relative Error in Stem Basal Area Estimates. *Canadian Journal of Forest Research*, 20 (5): 496–502.
- Gröger G, Plümer L (2012) CityGML – Interoperable Semantic 3D City Models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71: 12–33.
- Grünflächenamt Frankfurt am Main (2022) Das Frankfurter Baumkataster. <https://www.offenedaten.frankfurt.de/dataset/baumkataster-frankfurt-am-main>. Aufgerufen am: 20.03.2023.
- Guo JY (2023) *Physical Geodesy*. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Hirt PR, Hoegner L, Stilla U (2021a) A Concept for the Segmentation of Individual Urban Trees From Dense MLS Point Clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021: 171–178.
- Hirt PR, Stilla U (2023) Urbane Vegetation im Fluss der Zeit - Monitoring und Analyse durch mobile Erfassung. In: Weinold T (ed) 22. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2023: 178–187.
- Hirt PR, Xu Y, Hoegner L, Stilla U (2021b) Change Detection of Urban Trees in MLS Point Clouds Using Occupancy Grids. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 89 (4): 301–318.

- Hough PVC (1962) Method and Means for Recognizing Complex Patterns (US3069654A), U.S. Patent and Trademark Office. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021784152/publication/US3069654A?q=pn>
- Hui Z, Cheng P, Yang B, Zhou G (2022) Multi-Level Self-Adaptive Individual Tree Detection for Coniferous Forest Using Airborne LiDAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114: 103028.
- Hurst J, Geiger A (2020) Automatisierte Generierung eines 3D-Baumkatasters am Beispiel des KIT Campus Nord. In: REAL CORP 2020: Shaping Urban Change - Livable City Regions for the 21st Century: Proceedings of the 25th International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society : 15-18 September 2020, virtual conference. Ed.: Manfred Schrenk
- ISO/TC 211 Geoinformation/Geomatik (2003) DIN EN ISO 19107: Geoinformation - Raumbezugsschema (ISO 19107:2003); Englische Fassung prEN ISO 19107:2004.
- Kunz D, Geiger A (2018) Automatisierte Generierung eines 3D-Baumkatasters am Beispiel des KIT Campus Nord. In: 30.Forum Bauinformatik: von jungen Forschenden für junge Forschende. Hrsg.: M. Steiner: 217–224. 35.13.01; LK 01.
- Kutzner T, Chaturvedi K, Kolbe TH (2020) CityGML 3.0: New Functions Open Up New Applications. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88 (1): 43–61.
- Landeshauptstadt München (2023) Ausschreibung KR-Subm-2023-0004, Vermessungstechnische Straßenbefahrung - Leistungsbeschreibung. <https://vergabe.muenchen.de/Net-Server/PublicationControllerServlet?function=Detail&TOID=54321-NetTender-18736fdf005-50fea16cff68e414&Category=InvitationToTender>.
- LGV Hamburg (2023) Straßenbäume online. <https://www.hamburg.de/strassenbaeume-online-karte>. Aufgerufen am: 20.03.2023.
- Moser A, Rötzer T, Pauleit S, Pretzsch H (2017) City Trees: Growth, Functions and Services-risks and Research Prospects; [Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen-Risiken und Forschungsperspektiven]. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 188 (5-6): 94–111.
- Nagel J (2001) Skript Waldmessenlehre.
- Nguyen A, Le B (2013) 3D Point Cloud Segmentation: A Survey. In: 2013 6th IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM): 225–230.
- Nischwitz A, Fischer M, Haberäcker P, Socher G (2011) Computergrafik und Bildverarbeitung: Band II: Bildverarbeitung. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. 3., neu bearbeitete Auflage.
- OGC (2008) OpenGIS Encoding Standard 1.0: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard.

- OGC (2012) OpenGIS Encoding Standard 2.0: OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard.
- OGC (2016) OGC CityGML Quality Interoperability Experiment.
- OGC (2021a) CityGML 3.0 Conceptual Model. <https://github.com/opengeospatial/CityGML-3.0CM>.  
Aufgerufen am: 20.03.2023.
- OGC (2021b) OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard. <http://www.opengis.net/doc/IS/CityGML-1/3.0>.
- OGC (2023a) CityGML 3.0 Encodings. <https://github.com/opengeospatial/CityGML3.0-GML-Encoding>.  
Aufgerufen am: 20.03.2023.
- OGC (2023b) CityGML Overview. <https://www.ogc.org/standard/citygml>. Aufgerufen am: 14.03.2023.
- Ojashwini RN, Gangadhar Reddy R, Rani RN, Pruthvija B (2021) Edge Detection Canny Algorithm Using Adaptive Threshold Technique. In: Satapathy SC, Zhang YD, Bhateja V, Majhi R (eds) Intelligent Data Engineering and Analytics, volume 1177 of Advances in Intelligent Systems and Computing (pp. 469–477). Singapore: Springer Singapore.
- OpenMP (2023) OpenMP. <https://www.openmp.org>. Aufgerufen am: 16.05.2023.
- Otepka J, Ghuffar S, Waldhauser C, Hochreiter R, Pfeifer N (2013) Georeferenced Point Clouds: A Survey of Features and Point Cloud Management. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2 (4): 1038–1065.
- Pérez-Martín E, López-Cuervo Medina S, Herrero-Tejedor T, Pérez-Souza MA, Aguirre de Mata J, Ezquerro-Canalejo A (2021) Assessment of Tree Diameter Estimation Methods from Mobile Laser Scanning in a Historic Garden. *Forests*, 12 (8): 1013.
- Pulkkinen M (2012) On Non-Circularity of Tree Stem Cross-Sections: Effect of Diameter Selection on Cross-Section Area Estimation, Bitterlich Sampling and Stem Volume Estimation in Scots Pine. *Silva Fennica*, 46 (5B).
- Qi J (2023) GitHub Repository: jianboqi/CSF. <https://github.com/jianboqi/CSF>. Aufgerufen am: 16.05.2023.
- Rizon M, Yazid H, Saad P, Md Shakaff AY, Saad A (2005) Object Detection using Circular Hough Transform. *American Journal of Applied Sciences*, 2 (12): 1606–1609.
- Rötzer T, Reischl A, Rahman M, Pretzsch H, Pauleit S (2021) Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern: Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Stadtbäume im Klimawandel - Wuchsverhalten, Umweltleistungen und Perspektiven.

- Rutzinger M, Pratihast AK, Oude Elberink SJ, Vosselman G (2011) Tree Modelling from Mobile Laser Scanning Data-Sets. *The Photogrammetric Record*, 26 (135): 361–372.
- Safaie AH, Rastiveis H, Shams A, Sarasua WA, Li J (2021) Automated Street Tree Inventory Using Mobile LiDAR Point Clouds Based on Hough Transform and Active Contours. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 174: 19–34.
- Safe Software Inc (2023) FME by Safe Software. <https://fme.safe.com/platform>. Aufgerufen am: 12.04.2023.
- scikit-image (2023a) scikit-image Documentation for 0.20.0 - Module: feature: canny. <https://scikit-image.org/docs/stable/api/skimage.feature.html>. Aufgerufen am: 23.05.2023.
- scikit-image (2023b) scikit-image Documentation for 0.20.0 - Module: transform. [https://scikit-image.org/docs/stable/api/skimage.transform.html#skimage.transform.hough\\_circle](https://scikit-image.org/docs/stable/api/skimage.transform.html#skimage.transform.hough_circle). Aufgerufen am: 24.05.2023.
- scikit image (o.J.) Documentation: Circular and Elliptical Hough Transforms. [https://scikit-image.org/docs/stable/auto\\_examples/edges/plot\\_circular\\_elliptical\\_hough\\_transform.html](https://scikit-image.org/docs/stable/auto_examples/edges/plot_circular_elliptical_hough_transform.html). Aufgerufen am: 04.05.2023.
- Semmler R, Wochatz A (1994) Leitfaden zum Aufbau eines Baumkatasters, volume III., graph. Darst. of Umweltberatung für Kommunen. Berlin: Dt. Inst. für Urbanistik.
- Simonse M, Aschoff T, Spiecker H, Thies M (2003) Automatic Determination of Forest Inventory Parameters using Terrestrial Laser Scanning. *Proceedings of the Scandlaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*, : 252–258.
- Stadt Augsburg (2021) Digitales Baumkataster. <https://www.augsburg.de/umwelt-soziales/umwelt/stadtgruen/baeume-schuetzen/digitales-baumkataster>. Aufgerufen am: 20.03.2023.
- Stadtvermessung-Graz (2023) Baumkataster Graz. <https://geodaten.graz.at/WebOffice/synserver?project=baumkataster&client=core>. Aufgerufen am: 20.03.2023.
- Tockner A, Gollob C, Kraßnitzer R, Ritter T, Nothdurft A (2022) Automatic Tree Crown Segmentation Using Dense Forest Point Clouds From Personal Laser Scanning (PLS). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114: 103025.
- TUM-PF (2018) Testdaten: TUM City Campus - MLS test dataset. <https://www.pf.bgu.tum.de/pub/testdaten.html>. Aufgerufen am: 14.12.2022.
- TUM-PF (2022) Ein Sommer voller Messungen - Kampagnen 2022. <https://www.pf.bgu.tum.de/?view=article&id=343:ein-sommer-voller-messungen-kampagnen-2022&catid=64>. Aufgerufen am: 25.02.2023.
- Weil J (1986) The Synthesis of Cloth Objects. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 20 (4): 49–54.

- Weiser H, Schäfer J, Winiwarter L, Krašovec N, Fassnacht FE, Höfle B (2022) Individual Tree Point Clouds and Tree Measurements From Multi-Platform Laser Scanning in German Forests. *Earth System Science Data*, 14 (7): 2989–3012.
- West PW (2015) *Tree and Forest Measurement*. Cham: Springer International Publishing, 3 edition.
- Wysocki O, Schwab B, Hoegner L, Kolbe TH, Stilla U (2021) Plastic Surgery for 3D City Models: A Pipeline for Automatic Geometry Refinement and Semantic Enrichment. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-4-2021: 17–24.
- Yrttimaa T, Saarinen N, Kankare V, Hynynen J, Huuskonen S, Holopainen M, Hyypää J, Vastaranta M (2020) Performance of Terrestrial Laser Scanning To Characterize Managed Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stands Is Dependent on Forest Structural Variation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 168: 277–287.
- Zhang W (o.J.) CSF (Cloth Simulation Filter) Ground Filtering Algorithm for Airborne LIDAR Data. [http://ramm.bnu.edu.cn/researchers/wumingzhang/english/default\\_contributions.htm](http://ramm.bnu.edu.cn/researchers/wumingzhang/english/default_contributions.htm). Aufgerufen am: 14.02.2023.
- Zhang W, Qi J, Wan P, Wang H, Xie D, Wang X, Yan G (2016) An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*, 8 (6).
- Zhu J, Gehring J, Huang R, Borgmann B, Sun Z, Hoegner L, Hebel M, Xu Y, Stilla U (2020) TUM-MLS-2016: An Annotated Mobile LiDAR Dataset of the TUM City Campus for Semantic Point Cloud Interpretation in Urban Areas. *Remote Sensing*, 12 (11): 1875.
- Zintl T (2021) *Lokalisierung und Visualisierung urbaner Bäume aus MLS-Punktwolken*. Bachelor's thesis, Technische Universität München, München.

## Anhang A

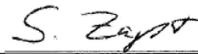
---

# Eidesstattliche Erklärung

---

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht und alle verwendeten Literaturquellen sind vollständig im Literaturverzeichnis aufgeführt. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt, war bisher nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung und ist noch nicht veröffentlicht.

München, 15.06.2023



---

Ort, Datum, Unterschrift



## Anhang B

---

# Computerspezifikationen

---

Tabelle B.1: Spezifikationen des verwendeten Laptops.

---

Gerät	ThinkBook 16 G4+ IAP
Prozessor	12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H 2.30 GHz
Installierter RAM	16,0 GB (15,7 GB verwendbar)
Systemtyp	64-Bit-Betriebssystem, x64-basierter Prozessor
Betriebssystem	Windows 11 Home
Grafikkarte 1	Intel(R) Iris(R) Xe Graphics
Grafikkarte 2	NVIDIA GeForce RTX 2050

---



## Anhang C

---

# Baumkataster

---

BAUMNUMM	HOCHWERT	RECHTSWERT	GATTUNGART	GATTUNG	GAL LANG	KR DURCHM	ST UMFANG	GEBIET	STRASSE	STANDORT	BAUMHOEH	ST DURCHM	PLANZJAHR	K-r
781	5552130,4	472234,429	G0413	Picea	Picea omorika, Serbische Fichte	4	62	Park	Sohnspark		13	20	1970	2
782	5552131,83	472237,289	G0413	Picea	Picea omorika, Serbische Fichte	3	46	Park	Sohnspark		8	15	1980	1,5
783	5552132,93	472239,159	G0413	Picea	Picea omorika, Serbische Fichte	3	49	Park	Sohnspark		8	16	1980	1,5
784	5552134,82	472240,169	G0413	Picea	Picea omorika, Serbische Fichte	4	63	Park	Sohnspark		10	20	1980	2
785	5552128,59	472239,989	G0065	Acer	Acer pseudoplatanus, Berg-Ahorn	11	262	Park	Sohnspark		24	84	1880	5,5
786	5552133,57	472243,949	G0674	Tsuga	Tsuga canadensis, Hemlockanne	5	73	Park	Sohnspark		10	23	1970	2,5
788	5552138,12	472243,899	G0409	Picea	Picea abies, Gewöhnliche Fichte	4	61	Park	Sohnspark		9	20	1970	2
793	5552147,63	472254,959	G0413	Picea	Picea omorika, Serbische Fichte	6	94	Park	Sohnspark		12	30	1970	3
794	5552143,52	472254,079	G0639	Taxus	Taxus baccata, Europäische Eibe	7	51	Park	Sohnspark		3	16	1940	3,5
796	5552142,6	472259,369	G0639	Taxus	Taxus baccata, Europäische Eibe	8	66	Park	Sohnspark		4	21	1940	4
797	5552145,29	472252,179	G0674	Tsuga	Tsuga canadensis, Hemlockanne	4	57	Park	Sohnspark		5	18	1980	2
798	5552146,29	472258,179	G0133	Betula	Betula pendula, Hänge-Birke	6	126	Park	Sohnspark		20	40	1960	3
799	5552140,46	472264,999	G0176	Chamaecyparis	Chamaecyparis lawsoniana, Lawsons Scht	5	71	Park	Sohnspark		5	23	1980	2,5
2	5549222,5	464241,349	G0653	Tilia	Tilia cordata, Winter-Linde	6	157	Spielplätze	Neu Zeilshelm Braunsch		16	50	1967	3
3	5549228,5	464232,349	G0653	Tilia	Tilia cordata, Winter-Linde	10	240	Spielplätze	Neu Zeilshelm Braunsch		17	76	1937	5
4	5549233,5	464223,349	G0653	Tilia	Tilia cordata, Winter-Linde	12	138	Spielplätze	Neu Zeilshelm Braunsch		16	44	1967	6
5	5549239,5	464211,359	G0653	Tilia	Tilia cordata, Winter-Linde	12	250	Spielplätze	Neu Zeilshelm Braunsch		19	80	1937	6
6	5549226,5	464201,359	G0653	Tilia	Tilia cordata, Winter-Linde	12	264	Spielplätze	Neu Zeilshelm Braunsch		18	84	1857	6
7	5549218,51	464201,359	G0653	Tilia	Tilia cordata, Winter-Linde	10	190	Spielplätze	Neu Zeilshelm Braunsch		14	61	1957	5
8	5549212,51	464220,349	G0085	Aesculus	Aesculus hippocastanum, Gewöhnliche R	15	374	Spielplätze	Neu Zeilshelm Braunsch		19	119	1857	7,5
9	5549197,51	464231,349	G0653	Tilia	Tilia cordata, Winter-Linde	10	230	Spielplätze	Neu Zeilshelm Braunsch		16	73	1937	5
10	5549204,51	464238,349	G0653	Tilia	Tilia cordata, Winter-Linde	9	163	Spielplätze	Neu Zeilshelm Braunsch		20	52	1952	4,5
1	5549859,97	468110,469	G0310	Juglans	Juglans regia, Erdle Walnuss	2	25	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 1	6	8	2006	1
3	5549857,73	468085,919	G0589	Salix	Salix matsudana -Tortuosa-, Korkenzieher	12	220	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 3	14	70	1950	6
8	5549810,25	468002,849	G0453	Populus	Populus nigra, Schwarz-Pappel	16	520	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 8	29	166	1920	8
10	5549818,07	468029,339	G0270	Fraxinus	Fraxinus excelsior, Gewöhnliche Esche	7	94	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 10	12	30	1980	3,5
11	5549809,65	468041,839	G0101	Alnus	Alnus glutinosa, Schwarz-Erle	4	107	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 11	12	34	1980	2
12	5549822,94	468040,209	G0270	Fraxinus	Fraxinus excelsior, Gewöhnliche Esche	7	104	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 12	12	33	1980	3,5
13	5549823,24	468047,219	G0270	Fraxinus	Fraxinus excelsior, Gewöhnliche Esche	6	126	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 13	10	40	1980	3
15	5549811,89	468059,869	G0101	Alnus	Alnus glutinosa, Schwarz-Erle	4	57	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 15	4	18	1970	2
18	5549814,42	468081,509	G0101	Alnus	Alnus glutinosa, Schwarz-Erle	4	66	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 18	6	21	1950	2
19	5549814,92	468083,379	G0101	Alnus	Alnus glutinosa, Schwarz-Erle	4	60	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 19	7	19	1950	2
21	5549815,92	468089,749	G0270	Fraxinus	Fraxinus excelsior, Gewöhnliche Esche	5	132	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 21	14	42	1960	2,5
22	5549815,44	468094,749	G0584	Salix	Salix alba, Silber-Weide	7	283	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 22	5	90	1950	3,5
24	5549825,47	468087,689	G0270	Fraxinus	Fraxinus excelsior, Gewöhnliche Esche	6	75	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 24	10	24	1980	3
30	5549816,4	468120,129	G0584	Salix	Salix alba, Silber-Weide	6	110	Grünanlagen	Woerthspitze	Alte Bnr. 30	13	35	1970	3

Abbildung C.1: Ausschnitt aus dem öffentlich zugänglichen Baumkataster der Stadt Frankfurt am Main als Tabelle. Daten stammen aus dem Mai 2022 und geben Auskünfte zu über 120.000 Bäumen auf öffentlichen Flächen, insbesondere Parks und Grünanlagen, Spielplätzen oder im Straßenbereich [Grünflächenamt Frankfurt am Main, 2022]

## Anhang D

---

# Methodik

---

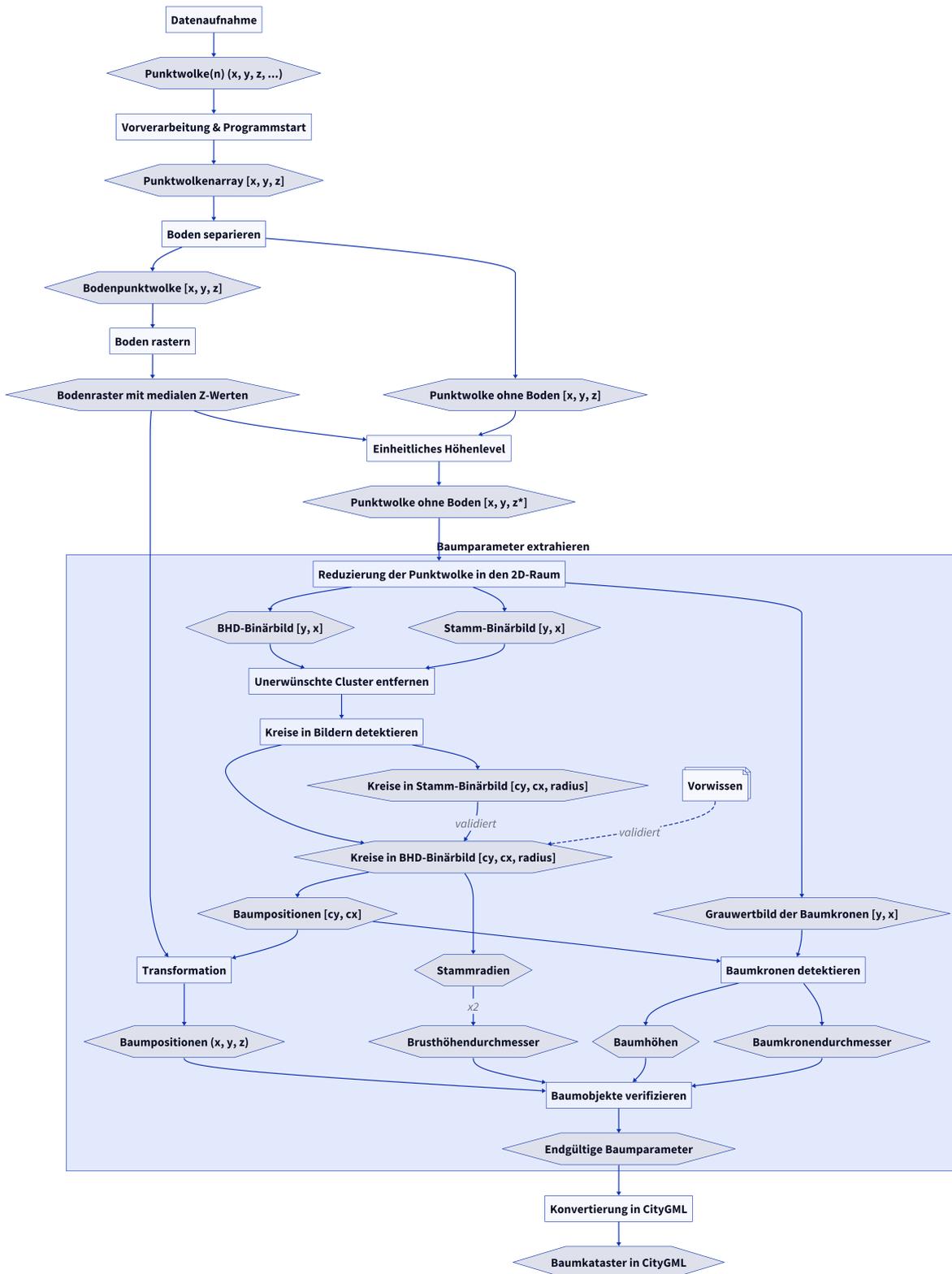


Abbildung D.1: Gesamttafel der entwickelten Methodik mit Detailausführung der Extraktion der Baumparameter als Ablaufdiagramm (eigene Darstellung). Die Rechtecke symbolisieren Arbeitsschritte, während die Hexagone die Ergebnisse aus den Arbeitsschritten beinhalten.

## Anhang E

---

# Referenzdaten Arcisstraße

---

Tabelle E.1: Messergebnisse der manuellen Vermessung der Bäume in der Arcisstraße 2023.

Index	BHD [m]	E [m]	N [m]	H [m]
101	0,35	691.107,828	5.336.112,227	513,241
102	0,15	691.105,140	5.336.105,448	514,005
103	0,50	691.102,301	5.336.098,689	513,960
104	0,48	691.099,861	5.336.091,788	513,446
105	0,48	691.097,196	5.336.085,069	513,332
106	0,50	691.094,820	5.336.078,549	513,348
107	0,42	691.091,748	5.336.070,841	513,370
108	0,43	691.089,362	5.336.064,310	513,496
109	0,13	691.086,759	5.336.057,507	513,299
110	0,46	691.084,041	5.336.050,853	513,225
111	0,48	691.081,546	5.336.044,375	513,438
201	0,54	691.114,404	5.336.109,589	513,247
202	0,55	691.111,840	5.336.102,930	513,288
203	0,53	691.109,089	5.336.096,242	513,331
204	0,08	691.106,344	5.336.089,019	513,304
205	0,41	691.103,888	5.336.082,267	513,262
206	0,78	691.101,566	5.336.075,867	513,359
207	0,48	691.098,623	5.336.068,370	513,210
208	0,29	691.096,273	5.336.061,957	513,234
209	0,34	691.093,872	5.336.055,500	513,228
210	0,44	691.090,780	5.336.047,981	513,280
211	0,30	691.088,512	5.336.041,632	513,317
301	0,53	691.121,300	5.336.107,136	513,259
302	0,58	691.118,800	5.336.100,148	513,295
303	0,36	691.116,190	5.336.093,415	513,255
304	0,57	691.113,239	5.336.086,276	513,289

---

305	0,20	691.110,520	5.336.079,567	513,239
306	0,30	691.107,986	5.336.072,819	513,222
307	0,28	691.105,282	5.336.065,712	513,274
308	0,53	691.103,013	5.336.059,603	513,383
309	0,20	691.100,520	5.336.052,955	513,173
310	0,50	691.097,955	5.336.045,541	513,303
311	0,44	691.095,289	5.336.039,066	513,342
602	0,50	691.056,108	5.335.968,530	514,225
603	0,53	691.053,234	5.335.961,264	514,285
604	0,53	691.050,344	5.335.953,424	514,403
605	0,53	691.047,500	5.335.946,214	514,326
606	0,25	691.044,869	5.335.939,416	514,304
607	0,08	691.041,730	5.335.931,356	514,363
608	0,10	691.039,136	5.335.924,090	514,370
609	0,22	691.036,255	5.335.916,637	514,404
610	0,29	691.033,725	5.335.909,718	514,440
611	0,34	691.030,940	5.335.902,375	514,537
701	0,66	691.067,217	5.335.972,899	514,343
702	0,63	691.064,450	5.335.965,190	514,147
703	0,61	691.061,615	5.335.957,837	514,296
705	0,08	691.055,981	5.335.942,878	514,345
706	0,59	691.053,203	5.335.935,851	514,335
707	0,54	691.050,364	5.335.928,315	514,438
708	0,55	691.047,593	5.335.921,026	514,484
709	0,18	691.044,805	5.335.913,378	514,443
710	0,51	691.042,391	5.335.906,489	514,494
711	0,58	691.039,746	5.335.899,218	514,531
802	0,62	691.083,049	5.335.957,864	514,227
803	0,24	691.080,427	5.335.950,757	514,239
804	0,69	691.077,341	5.335.942,940	514,312
805	0,09	691.074,312	5.335.935,159	514,325
806	0,58	691.071,506	5.335.928,113	514,355
807	0,58	691.068,835	5.335.921,039	514,375
808	0,69	691.066,356	5.335.913,913	514,435
809	0,68	691.063,618	5.335.906,316	514,507
810	0,78	691.061,017	5.335.899,266	514,512
901	0,20	NaN	NaN	NaN
902	0,19	NaN	NaN	NaN

---

---

903	0,20	NaN	NaN	NaN
904	0,19	NaN	NaN	NaN
911	0,39	NaN	NaN	NaN
912	0,35	NaN	NaN	NaN
913	0,44	NaN	NaN	NaN
914	0,40	NaN	NaN	NaN
915	0,39	NaN	NaN	NaN
916	0,47	NaN	NaN	NaN
917	0,34	NaN	NaN	NaN
918	0,58	NaN	NaN	NaN
919	NaN	NaN	NaN	NaN

---

Tabelle E.2: Messergebnisse der manuellen Vermessung der Bäume in der Arcisstraße 2021.

---

Index	BHD [m]	Baumhöhe [m]	E [m]	N [m]	H [m]
1	0.33	11.08	691107.22	5336112.12	561.47
2	0.14	7.19	691104.47	5336105.48	561.51
3	0.50	13.90	691101.69	5336099.13	561.46
4	0.48	13.18	691099.21	5336092.19	561.56
5	0.48	12.93	691096.57	5336085.14	561.42
6	0.50	13.80	691094.16	5336078.50	561.48
7	0.41	14.01	691091.14	5336070.87	561.49
8	0.43	13.35	691088.81	5336064.34	561.50
9	0.12	6.97	691086.22	5336057.43	561.44
10	0.46	10.36	691083.61	5336050.75	561.36
11	0.48	11.49	691081.29	5336044.43	561.50
12	0.54	16.69	691113.65	5336109.55	561.41
13	0.54	17.68	691111.44	5336103.31	561.54
14	0.51	16.87	691108.57	5336096.74	561.64
15	0.06	5.24	691105.77	5336089.27	561.48
16	0.39	13.33	691103.38	5336082.16	561.49
17	0.63	14.52	691100.81	5336076.03	561.56
18	0.47	14.77	691098.13	5336068.42	561.36
19	0.27	10.77	691095.66	5336062.01	561.39
20	0.34	9.56	691093.32	5336055.49	561.47
21	0.43	12.36	691090.33	5336048.10	561.42
22	0.29	8.30	691087.91	5336041.66	561.36
23	0.53	15.04	691120.40	5336107.22	561.46

---

---

24	0.55	14.77	691118.08	5336100.34	561.52
25	0.35	17.55	691115.54	5336093.84	561.48
26	0.56	17.35	691112.54	5336086.37	561.38
27	0.19	10.86	691109.91	5336079.66	561.25
28	0.27	11.37	691107.25	5336072.91	561.29
29	0.27	12.97	691104.64	5336065.88	561.44
30	0.53	16.25	691102.34	5336059.62	561.50
31	0.20	8.22	691100.01	5336052.87	561.25
32	0.50	11.89	691097.32	5336045.58	561.44
33	0.43	13.16	691094.78	5336039.26	561.39
34	0.52	14.76	691127.14	5336104.75	561.45
35	0.14	12.62	691124.88	5336097.78	561.43
36	0.38	14.94	691122.24	5336090.87	561.42
37	0.48	15.19	691119.55	5336083.61	561.50
38	0.33	16.76	691134.21	5336102.06	561.40
39	0.50	16.85	691131.18	5336095.17	561.47
40	0.10	6.91	691128.91	5336088.21	561.46
41	0.57	15.45	691126.13	5336081.36	561.93
42	0.55	17.56	691142.00	5336099.00	561.40
43	0.46	17.64	691138.16	5336092.75	561.40
44	0.25	12.08	691135.98	5336086.07	561.48
45	0.08	5.10	691133.30	5336078.73	561.36
46	0.43	15.13	691130.98	5336072.40	561.47
47	0.17	7.52	691128.65	5336065.27	561.55
48	0.38	12.02	691125.53	5336056.96	561.39
49	0.43	13.42	691123.22	5336051.58	561.33
50	0.37	10.91	691121.03	5336045.95	561.33
51	0.22	8.82	691118.04	5336037.82	561.35
52	0.48	11.84	691115.66	5336030.99	561.40
53	0.50	14.07	691055.43	5335968.63	561.81
54	0.54	18.25	691052.68	5335961.36	561.66
55	0.53	16.29	691049.58	5335953.59	561.96
56	0.52	15.89	691046.35	5335946.78	561.88
57	0.23	9.47	691044.16	5335939.52	561.89
58	0.07	5.44	691041.20	5335931.88	561.90
59	0.07	4.90	691038.57	5335924.25	561.97
60	0.20	7.59	691035.69	5335916.59	562.00
61	0.25	9.86	691033.16	5335909.79	561.96

---

---

62	0.33	9.63	691030.17	5335902.43	562.18
63	0.67	17.05	691063.65	5335965.18	561.75
64	0.62	17.24	691060.79	5335958.10	561.82
65	NaN	NaN	691057.98	5335950.50	561.82
66	0.06	4.64	691055.25	5335943.94	561.81
67	0.58	11.63	691052.58	5335936.04	561.93
68	0.53	15.14	691049.77	5335928.55	561.95
69	0.55	16.14	691047.06	5335921.03	562.10
70	0.18	7.95	691044.21	5335913.63	562.03
71	0.48	13.02	691041.77	5335906.76	562.12
72	0.57	11.73	691039.23	5335899.42	562.08
73	0.67	17.15	691066.53	5335973.00	561.68
74	0.69	14.11	691082.55	5335958.11	561.78
75	0.22	9.83	691079.77	5335951.77	561.72
76	0.71	18.80	691076.80	5335943.41	561.89
77	0.06	4.35	691073.91	5335935.95	561.93
78	0.57	16.06	691070.96	5335928.42	561.82
79	0.58	16.14	691068.41	5335921.50	561.86
80	0.70	16.94	691065.59	5335914.31	561.94
81	0.66	16.65	691062.38	5335906.75	561.92
82	0.82	16.90	691060.32	5335899.55	561.89

---

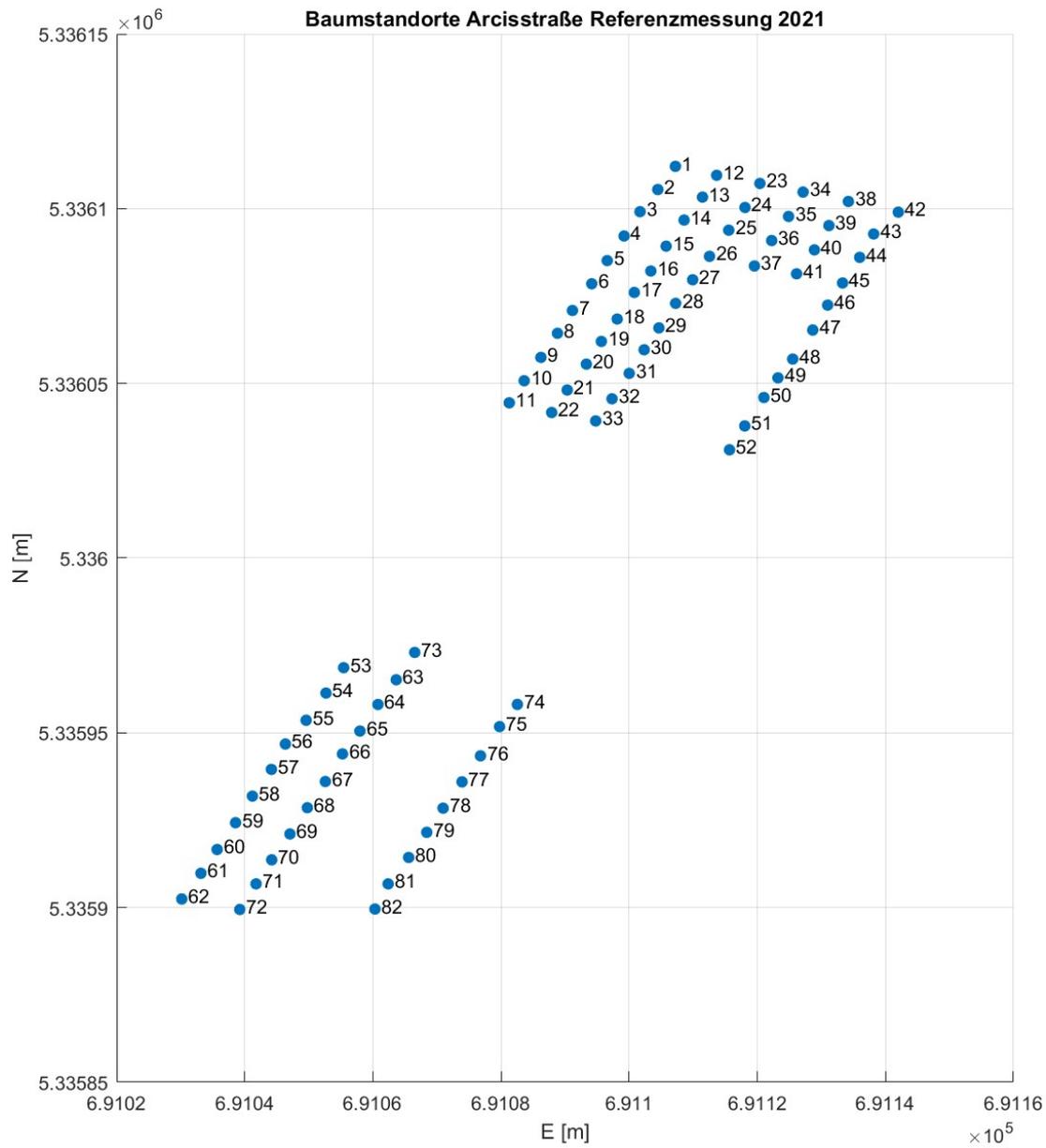


Abbildung E.1: Darstellung der manuell gemessenen Bäume 2021 in der Arcisstraße mit Nummerierung.

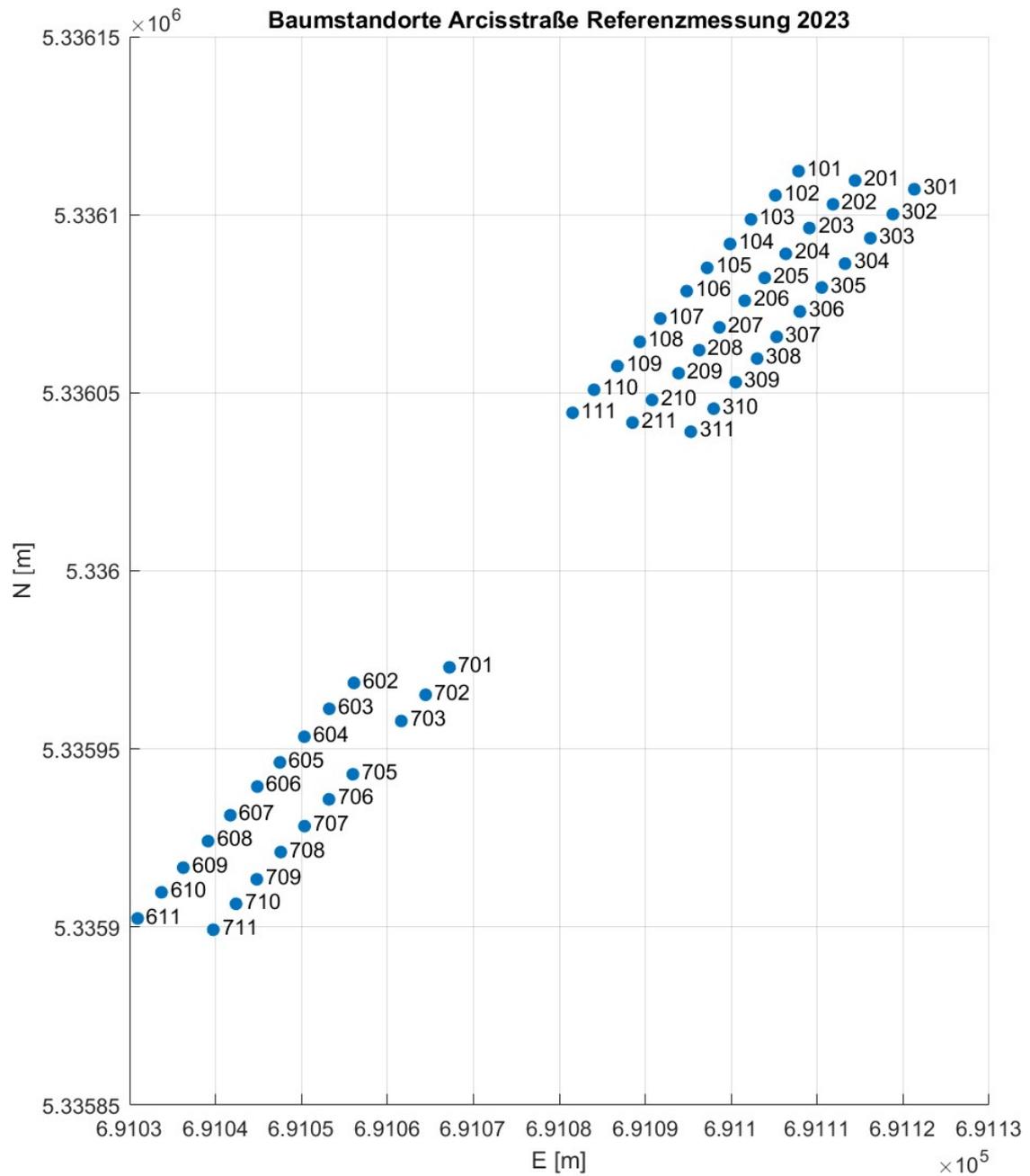


Abbildung E.2: Darstellung der manuell gemessenen Bäume 2023 in der Arcisstraße mit Nummerierung.



## Anhang F

---

# Pasinger Kloostergarten

---



Abbildung F.1: Streuobstwiese im Pasinger Kloostergarten. August 2022 (eigene Aufnahme).



Abbildung F.2: Insel und Waldgebiet im Pasinger Kloostergarten. August 2022 (eigene Aufnahme).



Abbildung F.3: Gemüsegarten im Pasinger Klostergarten. August 2022 (eigene Aufnahme).



Abbildung F.4: Würminsel mit Inselhaus im Pasinger Klostergarten. Oktober 2022 (eigene Aufnahme).

## Anhang G

---

# Numerische Ergebnisse

---

Tabelle G.1: Extrahierte Baumparameter in der Arcisstraße Nord.

Index	x [m]	y [m]	z [m]	Baumhöhe [m]	BHD [m]	Kronendurchmesser [m]
0	691.091,476	5.336.086,238	561,210	10	0,05	4
1	691.091,401	5.336.086,163	561,210	10	0,05	4
2	691.118,101	5.336.082,838	561,724	14	0,10	6
3	691.125,626	5.336.079,013	561,503	14	0,10	5
4	691.091,476	5.336.086,163	561,210	10	0,20	4
5	691.094,751	5.336.100,438	561,150	11	0,20	1
6	691.109,076	5.336.114,238	561,836	11	0,25	7
7	691.104,851	5.336.061,213	561,679	13	0,25	5
8	691.088,151	5.336.072,738	561,372	15	0,25	7
9	691.109,976	5.336.079,688	561,710	11	0,30	6
10	691.105,851	5.336.026,638	561,208	5	0,30	1
11	691.116,501	5.336.085,613	561,692	17	0,30	4
12	691.107,226	5.336.112,438	561,773	12	0,30	7
13	691.115,676	5.336.093,613	561,705	17	0,30	8
14	691.083,026	5.336.035,163	561,556	5	0,35	1
15	691.099,976	5.336.052,988	561,675	9	0,40	5
16	691.107,401	5.336.072,938	561,592	11	0,35	9
17	691.106,326	5.336.111,688	561,730	12	0,35	8
18	691.113,076	5.336.082,813	561,692	15	0,35	5
19	691.096,926	5.336.039,263	561,490	10	0,40	5
20	691.104,726	5.336.065,788	561,639	12	0,40	7
21	691.104,501	5.336.105,538	561,709	16	0,40	7
22	691.095,751	5.336.062,113	561,688	11	0,45	7
23	691.088,001	5.336.041,713	561,717	9	0,50	5
24	691.103,326	5.336.082,338	561,660	13	0,50	9

25	691.103,776	5.336.103,763	561,782	14	0,50	7
26	691.099,351	5.336.091,888	561,703	14	0,50	10
27	691.097,501	5.336.045,663	561,611	12	0,55	7
28	691.093,351	5.336.055,588	561,671	10	0,55	6
29	691.096,651	5.336.085,088	561,710	13	0,60	6
30	691.098,151	5.336.068,388	561,638	14	0,60	9
31	691.122,276	5.336.090,863	561,695	15	0,60	5
32	691.090,276	5.336.048,113	561,696	12	0,60	8
33	691.083,576	5.336.050,938	561,758	11	0,60	9
34	691.101,776	5.336.098,738	561,740	15	0,65	13
35	691.138,526	5.336.092,413	561,817	13	0,75	2
36	691.108,601	5.336.096,263	561,728	17	0,75	11
37	691.094,276	5.336.078,563	561,705	13	0,75	10
38	691.131,026	5.336.071,938	561,680	10	0,75	3
39	691.112,726	5.336.086,338	561,708	17	0,80	9
40	691.119,826	5.336.083,638	561,715	14	0,80	6
41	691.111,326	5.336.102,913	561,706	17	0,80	11
42	691.088,876	5.336.064,563	561,765	13	0,80	10
43	691.118,401	5.336.100,138	561,658	16	0,90	6
44	691.123,376	5.336.051,113	562,627	10	0,85	5
45	691.114,076	5.336.109,663	561,679	17	1,00	9
46	691.131,776	5.336.095,038	561,772	15	0,95	3
47	691.123,451	5.336.051,038	561,751	10	1,00	5
48	691.121,001	5.336.107,188	561,702	17	1,05	9
49	691.141,001	5.336.099,088	561,580	15	1,10	5
50	691.101,051	5.336.075,738	561,698	15	1,25	12
51	691.106,476	5.336.112,563	561,800	12	1,85	7

Tabelle G.2: Extrahierte Baumparameter im Pasinger Klostergarten

Index	x [m]	y [m]	z [m]	Baumhöhe [m]	BHD [m]	Kronendurchmesser [m]
0	682.749,198	5.335.441,959	525,362	10	0,08	9
1	682.749,118	5.335.441,879	525,371	10	0,08	9
2	682.721,078	5.335.433,439	525,664	23	0,08	6
3	682.810,158	5.335.434,359	525,517	16	0,08	9
4	682.810,158	5.335.434,559	525,517	16	0,08	9
5	682.770,678	5.335.494,959	527,464	8	0,16	4
6	682.749,198	5.335.441,879	525,362	10	0,16	9

---

7	682.770,078	5.335.494,879	527,406	8	0,16	3
8	682.760,718	5.335.496,279	527,970	14	0,16	6
9	682.755,958	5.335.466,039	524,762	4	0,16	3
10	682.777,318	5.335.464,559	524,827	8	0,16	5
11	682.720,838	5.335.473,159	524,161	25	0,24	10
12	682.755,118	5.335.404,239	526,748	14	0,24	4
13	682.781,558	5.335.387,519	526,166	20	0,24	10
14	682.730,478	5.335.466,999	524,188	13	0,24	6
15	682.815,478	5.335.430,519	525,698	6	0,24	3
16	682.719,918	5.335.422,599	528,456	21	0,32	6
17	682.791,278	5.335.385,519	526,523	11	0,32	3
18	682.739,878	5.335.417,199	529,396	24	0,32	7
19	682.712,838	5.335.458,439	524,245	21	0,32	10
20	682.792,118	5.335.385,439	526,523	11	0,32	3
21	682.748,318	5.335.448,519	525,090	9	0,32	5
22	682.710,438	5.335.462,639	524,437	21	0,32	6
23	682.716,838	5.335.464,079	524,133	21	0,32	7
24	682.793,438	5.335.386,319	526,279	12	0,40	4
25	682.746,878	5.335.408,159	527,168	27	0,40	7
26	682.773,078	5.335.431,399	525,483	20	0,48	7
27	682.802,798	5.335.435,319	525,719	21	0,48	12
28	682.783,238	5.335.437,639	525,651	10	0,48	8
29	682.722,118	5.335.422,839	528,154	21	0,48	4
30	682.773,678	5.335.419,439	525,286	23	0,48	6
31	682.814,598	5.335.420,919	525,712	6	0,48	2
32	682.762,518	5.335.449,919	525,509	13	0,48	7
33	682.782,838	5.335.454,599	525,224	12	0,48	8
34	682.746,158	5.335.476,519	524,306	10	0,48	8
35	682.745,798	5.335.456,919	524,831	8	0,56	6
36	682.745,318	5.335.467,439	524,471	8	0,56	5
37	682.790,558	5.335.386,759	526,258	18	0,56	5
38	682.750,158	5.335.443,639	525,278	10	0,56	9
39	682.715,038	5.335.450,119	524,455	11	0,64	2
40	682.778,558	5.335.430,359	525,471	8	0,64	6
41	682.774,998	5.335.426,839	525,419	20	0,64	10
42	682.794,318	5.335.425,439	525,417	20	0,64	15
43	682.796,478	5.335.425,719	525,402	22	0,64	14
44	682.740,318	5.335.476,759	524,168	8	0,64	6

---

---

45	682.745,078	5.335.429,479	525,263	27	0,72	7
46	682.770,318	5.335.428,039	525,403	24	0,72	6
47	682.777,038	5.335.415,279	525,264	10	0,72	5
48	682.769,838	5.335.452,639	525,380	8	0,72	4
49	682.795,798	5.335.416,119	525,268	10	0,72	6
50	682.704,278	5.335.429,159	526,195	18	0,80	6
51	682.762,838	5.335.470,159	524,580	6	0,88	5
52	682.783,118	5.335.415,839	525,214	8	1,04	5
53	682.756,598	5.335.451,039	525,269	6	1,04	4
54	682.753,438	5.335.460,199	524,873	8	1,12	7
55	682.786,598	5.335.442,519	525,619	9	1,12	6
56	682.766,278	5.335.449,359	525,510	15	1,28	7
57	682.710,678	5.335.432,319	526,093	22	1,28	2
58	682.784,158	5.335.462,839	524,952	8	1,36	4
59	682.748,878	5.335.448,799	525,090	9	1,44	5
60	682.768,438	5.335.465,679	524,738	6	1,44	5
61	682.750,198	5.335.442,639	525,317	10	1,52	9
62	682.744,678	5.335.467,239	524,446	8	1,68	7
63	682.791,238	5.335.386,559	526,264	13	1,76	4
64	682.792,878	5.335.385,679	526,572	12	1,92	3

---

Tabelle G.3: Extrahierte Baumparameter in der Arcisstraße Süd.

Index	x [m]	y [m]	z [m]	Baumhöhe [m]	BHD [m]	Kronendurchmesser [m]
0	691024,872	5335901,741	562,289	3	0,20	1
1	691018,947	5335879,316	561,947	7	0,35	3
2	691044,247	5335939,691	562,153	9	0,35	6
3	691028,172	5335911,716	562,288	11	0,35	1
4	691035,672	5335916,891	562,234	8	0,35	5
5	691038,322	5335923,841	562,215	5	0,35	2
6	691030,372	5335902,616	562,385	10	0,40	6
7	691033,222	5335909,941	562,266	9	0,45	6
8	691051,922	5335984,941	561,789	3	0,50	1
9	691041,272	5335931,991	562,166	13	0,55	8
10	691041,897	5335906,816	562,269	12	0,55	9
11	691055,522	5335968,816	561,951	14	0,60	11
12	691049,772	5335953,691	562,151	16	0,70	9
13	691052,647	5335961,566	562,083	16	0,75	9
14	691061,072	5335958,041	562,023	18	0,85	7
15	691063,972	5335965,341	561,934	17	0,90	5
16	691047,047	5335921,141	562,185	16	0,90	11
17	691049,922	5335928,716	562,153	15	1,00	10
18	691066,697	5335973,066	562,169	17	1,05	11
19	691047,072	5335946,566	562,124	16	1,00	10
20	691052,847	5335936,266	562,095	13	1,10	8