

Automatisierte Generierung eines Baumkatasters aus Punktwolken in unterschiedlichen urbanen Umgebungen

SABINE ZAGST¹ & PHILIPP-ROMAN HIRT¹

Zusammenfassung: Baumkataster besitzen eine bedeutende Funktion für die Erfassung und Verwaltung des Baumbestands. Bisher erforderte die Aufnahme von Stammdaten der Bäume aufwendige manuelle Messverfahren. Zur Beschleunigung dieses Verfahrens wird eine Methodik vorgestellt, welche die Extraktion von Baumparametern aus Punktwolken in unterschiedlichen urbanen Umgebungen ermöglicht. Als Ergebnis des vollautomatischen Workflows liegt ein Baumkataster sowohl in tabellarischer Form als auch in Form semantischer 3D-Modelle im CityGML-Format vor. Automatisierungsbeschränkungen ergeben sich aufgrund verschiedener Punktwolkencharakteristiken, die eine Anpassung einzelner Programmparameter erfordern. Mit Ausnahme des Brusthöhendurchmessers erfüllen die resultierenden Baumparameter Position, Höhe und Kronendurchmesser die Genauigkeitsanforderungen eines Baumkatasters.

1 Einleitung

Insbesondere im urbanen Raum steigern Bäume die Lebensqualität, werten das Stadtbild auf und verbessern das Stadtklima entscheidend. Um dabei die Sicherheit von Verkehrsteilnehmern zu wahren, müssen gesetzlich vorgeschriebene Baumkontrollen durchgeführt werden (BAUMGARTEN et al. 2004). Hierzu dient ein Baumkataster als Dokumentationsrahmen sowie als Planungshilfe, ist aber an sich nicht gesetzlich vorgeschrieben (BAUMGARTEN et al. 2004). Die erforderlichen Baumparameter jedes Baums im Stadtgebiet werden herkömmlich durch zeitaufwendige, manuelle Messmethoden ermittelt. Die erfassten Baumdaten variieren von Baumkataster zu Baumkataster und beinhalten beispielsweise die Lagekoordinaten sowie weitere Informationen wie Brusthöhendurchmesser (BHD), Baumart, Gesundheitszustand und Baumhöhe.

Über die Nutzung in der Stadtverwaltung hinaus können die Daten eines Baumkatasters zur realitätsnahen Visualisierung der Bäume in einem Digitalen Zwilling eingesetzt werden. So kann der Baumbestand in Planungen und Simulationen einbezogen werden, wodurch zum Beispiel Solarpotential-, Sichtlinien- oder Abschattungsanalysen bereichert werden (HURST & GEIGER 2020).

2 Problemstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, wie und bis zu welchem Grad zukünftig die zeitaufwendige manuelle Aufnahme der Stammdaten von Bäumen durch ein automatisiertes Verfahren unter Verwendung von Punktwolken ersetzt werden kann. Nachfolgend werden das Konzept und die Umsetzung einer solchen Methodik vorgestellt und die Ergebnisse abschließend

¹ Technische Universität München, Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung, Arcisstraße 21, D-80333 München, E-Mail: [s.zagst, philipp.hirt]@tum.de

mit manuell gewonnenen Referenzdaten verglichen. Übergeordnetes Ziel ist dabei, eine Schnittstelle zwischen dem resultierenden Baumkataster und einem semantischen 3D-Stadtmodell zu schaffen, um im Zuge dessen Simulationen unter Beachtung der hohen Vegetation zu ermöglichen.

Als Datengrundlage dienen Punktwolken, welche mittels fahrzeuggestütztem bzw. rucksackgetragendem Mobile Laser Scanning (MLS) in einem Straßenzug und einer Parkanlage aufgenommen wurden, um die Systemunabhängigkeit und die Anwendung des entwickelten Verfahrens in unterschiedlichen urbanen Umgebungen zu demonstrieren.

3 Aktueller Forschungsstand

Gemäß dem gegenwärtigen Forschungsstand existiert bisher kein Ansatz zur automatisierten Erstellung eines urbanen Baumkatasters im CityGML-Format, das sich auf Punktwolkendaten stützt. Im Folgenden werden zunächst bestehende Verfahren vorgestellt, die sich mit der Einzelbaumsegmentierung oder der Ableitung von Baumparametern im Speziellen befassen. Ergänzend werden zum hier präsentierten Ansatz verwandte Methoden beleuchtet, die die Segmentierung und Parameterbestimmung in Kombination durchführen. Abschließend werden Vorarbeiten zur Erstellung eines Baumkatasters im CityGML-Format diskutiert.

3.1 Einzelbaumsegmentierung und Extraktion von Baumparametern

Ein aktuelles Forschungsthema auf dem Weg zur Bestimmung von Baumparametern ist die Segmentierung von Einzelbäumen aus Punktwolken. Diese kann als gesonderter Verarbeitungsschritt oder direkt im Zusammenhang mit der Ermittlung von Baumparametern erfolgen. Im Bereich der reinen Baumsegmentierung können punktbasierte und voxelbasierte Methoden unterschieden werden (HIRT et al. 2021a). Neuere Ansätze verwenden Künstliche Intelligenz und Deep Learning zur Baumsegmentierung, wozu zum Beispiel (SAFAIE et al. 2021) zählt. Da die exakte Segmentierung von Bäumen in variierenden Umgebungen eine größere Schwierigkeit darstellt, werden Einzelbäume in diesen Fällen oft noch manuell oder semi-automatisch aus Punktwolken segmentiert. Beispiele hierfür sind (WEISER et al. 2022) und (PÉREZ-MARTÍN et al. 2021).

Zur Bestimmung von Baumparametern wie Kronendurchmesser, Höhe und BHD finden sich vor allem im Bereich der Forstinventur etablierte Ansätze. Eine Möglichkeit ist die exakte geometrische Modellierung des Einzelbaums mittels eines Quantitative Structure Models (QSM), was noch detailliertere Analysen und vor allem genaue Volumenberechnungen erlaubt. Hier sind besonders TreeQSM (RAUMONEN et al. 2013) unter Verwendung von patch-basierter Segmentierung und SimpleTree (HACKENBERG et al. 2015) mit dem Sphere-Following-Ansatz hervorzuheben. Beide modellieren den Einzelbaum als Konstrukt aus verbundenen Zylindern. Eine bei all diesen Ansätzen relevante Voraussetzung ist jedoch eine möglichst vollständige Punktwolke des Baumes, die im Fall der Forstinventur meist durch mehrere terrestrische Scanstandpunkte realisiert wird. Eine vergleichbar homogene und von allen Seiten vollständige Repräsentation von Bäumen ist im Fall des fahrzeuggestützten mobilen Laserscannings nicht realisierbar. YAZDI et al. (2024) wenden QSM auf MLS-Punktwolken an, entwickeln aber

aufgrund von Fehlern in den abgeleiteten QSM ebenfalls einen eigenen schichtbasierten Ansatz zur Ableitung der wichtigsten Parameter.

Für den in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz, der die Einzelbaumsegmentierung im Zusammenhang mit der Extraktion der Baumparameter durchführt, wird daher auf das Verfahren von ZINTL (2021) aufgebaut. Die methodische Grundlage dieses Ansatzes wurde durch die Vorgehensweise von SIMONSE et al. (2003), ASCHOFF et al. (2004) und BIENERT et al. (2007) inspiriert. Das Prinzip besteht darin, aus der Punktwolke parallel zur Bodenebene differenzierte Schichten zu extrahieren und diese in unterschiedliche 2D-Rasterbilder zu projizieren. Die Detektion der Baumstämme und damit der Segmentierung der Bäume in den Bildern erfolgt durch die Anwendung gängiger Bildverarbeitungsfunktionen sowie einer zirkulären Hough-Transformation. Auf diese Weise werden die Stämme als Kreise identifiziert, was die Ermittlung des BHD und der räumlichen Position der Bäume ermöglicht. Die Durchmesser der Baumkronen werden aus einem weiteren Grauwertbild, welches die Punktwolke in Vogelperspektive darstellt, durch den Einsatz von Region-Growing-Verfahren bestimmt. Eine ähnliche Methodik zur Ermittlung von Baumparametern von schon vorsegmentierten Einzelbäumen wird von WEISER et al. (2022) in ihrer Publikation verfolgt. Im Gegensatz zu den Ausführungen von ZINTL (2021) erfolgt die Identifikation der Kreise im 2D-Bild durch den Einsatz des Random Sample Consensus (RANSAC). Des Weiteren nutzen sie ein Digitales Geländemodell (DGM), das auf Airborne Laser Scanning (ALS)-Punktwolken basiert, um Höhenunterschiede im Gelände zu berücksichtigen und das Null-Höhenlevel zu definieren. Im Unterschied dazu wurde bei ZINTL (2021) ausschließlich ein konstanter Höhenwert verwendet, um den Boden und damit das Höhennulllevel zu markieren.

3.2 Baumkataster in CityGML

Die hier vorgestellte Idee, ein Baumkataster in dreidimensionaler Form unter Verwendung des CityGML-Formats zu modellieren, setzen KUNZ & GEIGER (2018) in vergleichbarer Weise um. Sie nutzen ein schon existierendes Baumkataster und transformieren dieses mit Hilfe einer Feature Manipulation Engine (FME)-Workbench in CityGML. Zur Modellierung der Bäume wird die Klasse SolitaryVegetationObject des Vegetations-Moduls mit den Baummetriken als Attribute genutzt. HURST & GEIGER (2020) versuchten diese Transformation mit einem reinen Python-Programm umzusetzen. Dies gelang allerdings lediglich als parametrisierter Export der Baummetriken und unter Einbeziehung des Nutzers. Aufgrund der komplexen Modellierung von Bäumen in CityGML war es nicht möglich, geometrische Baummodelle pythonbasiert in CityGML zu generieren.

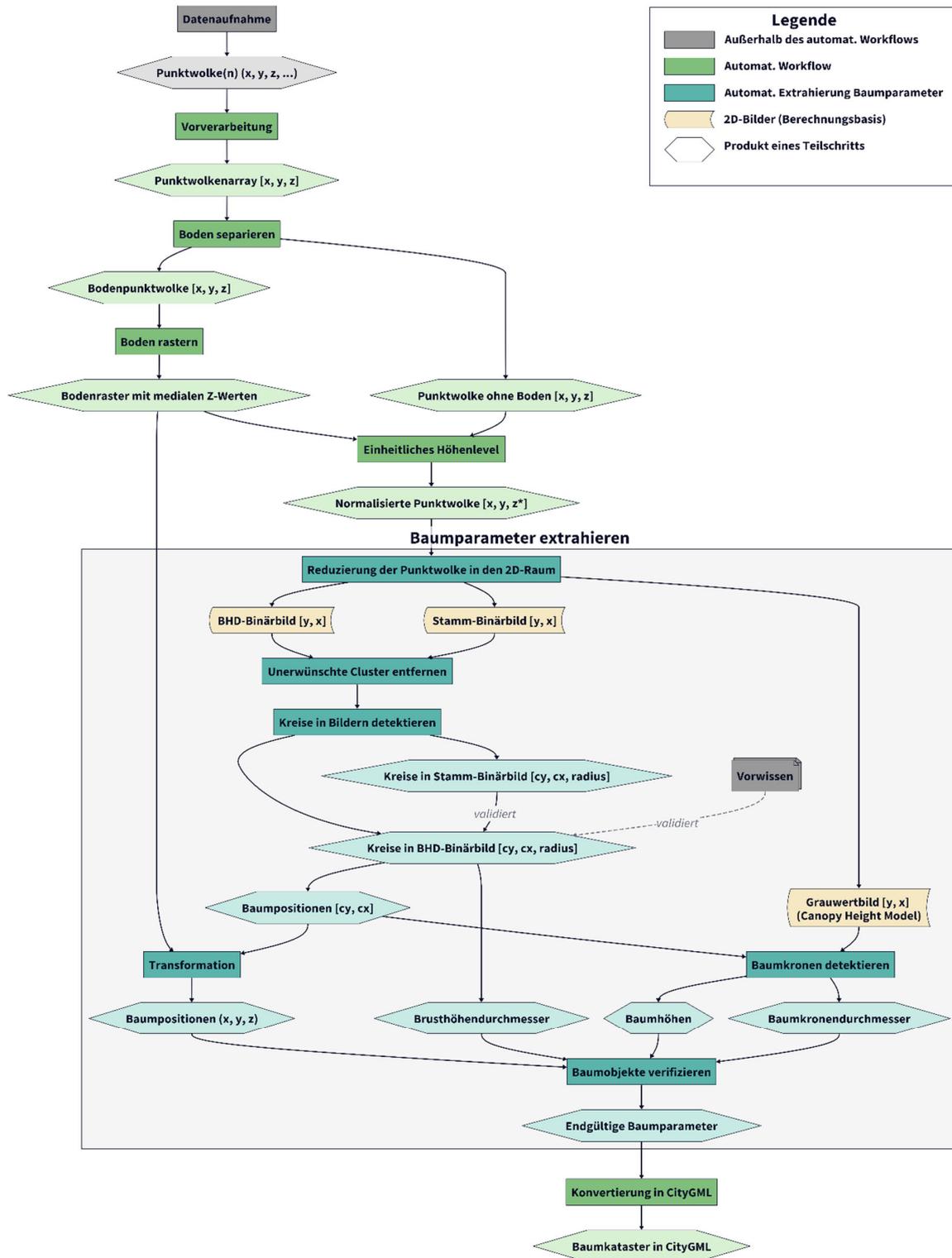


Abb. 1: Entwickelte Methodik als Ablaufdiagramm

4 Automatisiertes Verfahren zur Generierung eines Baumkatasters

Der Ablauf des automatisierten Verfahrens ist in Abb. 1 dargestellt. Nach der Datenaufnahme, die hier bewusst sensorunabhängig formuliert wird, konzentriert sich der erste Teil auf die Reduzierung der Punktwolke auf ein einheitliches Höhenniveau. Anschließend werden in einem schichtbasierten Verfahren die Baumparameter extrahiert und schließlich in CityGML überführt. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden näher erläutert.

Den Ausgangspunkt stellt die Datenaufnahme zur Gewinnung der Punktwolken dar, die mit allen gängigen Laserscanning-Methoden erfolgen kann. Jedoch eignen sich Messverfahren vom Boden aus wie MLS, Terrestrisches Laserscanning (TLS) oder Personal Laser Scanning (PLS) eher, da die Bäume möglichst in ihrer Gesamtheit in der Punktwolke abgebildet sein sollten. Die anschließende Vorverarbeitung zur Datenreduzierung und -bereinigung orientiert sich an (HIRT et al. 2021b).

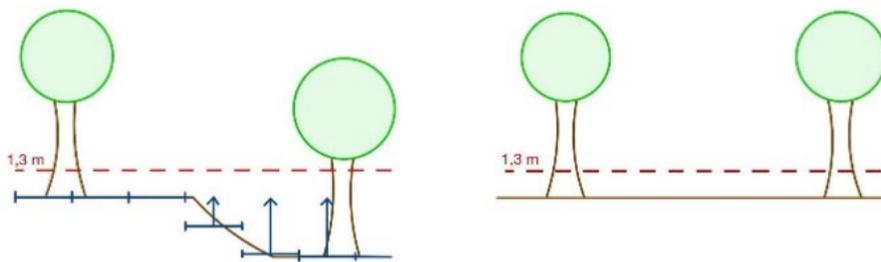


Abb. 2: Veranschaulichung der Bodenprozessierung. Die blauen Linien symbolisieren die Rasterung des Bodens und die resultierende Höhenänderung, während die rot gestrichelte Linie die BHD-Bezugshöhe von 1,3 m Höhe darstellt

Der nächste elementare Schritt vor der Extraktion der Baumparameter liegt in der Separierung der Bodenpunkte und der Ermittlung einer Höhenbezugsfläche, was darüber hinaus die Datenmenge für die weitere Verarbeitung reduziert. Hierzu wird zunächst der Cloth Simulation Filter (CSF) angewendet, welcher im überwiegend ebenen Gelände die Bodenpunkte zuverlässig und mit geringer Laufzeit von der restlichen Punktwolke trennt (ZHANG et al. 2016). Die Bodenpunktwolke dient im Folgenden zur Herstellung einer Höhenreferenzfläche, während aus der Punktwolke ohne Boden die Baumparameter extrahiert werden.

In der Mehrzahl der wissenschaftlichen Publikationen zur Ermittlung von Baumparametern wird ein DGM generiert, welches die Höhenbezugsfläche repräsentiert und zur Bestimmung der Baumhöhen erforderlich ist (SIMONSE et al. 2003; ASCHOFF et al. 2004; WEISER et al. 2022; HURST & GEIGER 2020). Optional kann auch ein einzelner definierter Höhenwert als Höhenreferenzfläche fungieren (ZINTL 2021), was allerdings zu erheblichen Ungenauigkeiten der Baumhöhen führt, da er schiefe oder unebene Geländeverläufe nur unzureichend abbilden kann. Um die vergleichsweise aufwendige Generierung eines DGMs zu umgehen, aber gleichzeitig schiefen oder unebenen Böden gerecht zu werden, wird hier ein eigenes Verfahren innerhalb der automatisierten Methodik verwendet. Es basiert auf der horizontalen Rasterung der separierten Bodenpunkte aus dem CSF. Bei ebenen Böden kann dieses Raster im Meterbereich gesetzt werden. Je unebener und steiler der Boden ist, desto feiner muss das Raster gewählt werden. Zur nachfolgenden Veränderung der Höhenwerte der Punktwolke wird von jedem Punkt der entsprechende Medianwert der

zugehörigen Bodenrasterzelle subtrahiert, wodurch der Boden künstlich geebnet wird und eine einheitliche Höhenbezugsfläche entsteht (vgl. Abb. 2). So ist es möglich, zum Boden parallele Schichten auf einheitlichen Baumhöhen aus der normalisierten Punktwolke auszuschneiden, was vor allem zur Bestimmung der BHD auf einer definierten Höhe von 1,3 m im späteren Verlauf wichtig ist.

Für die Extraktion der Baumparameter ist das Vorgehen im blau unterlegten Bereich in Abb. 1 detailliert dargestellt. Als Ausgangsbasis dient die zuvor generierte Punktwolke mit einheitlichem Höhenlevel der Bäume und ohne Boden. Eine vorgeschaltete semantische Segmentierung der Bäume aus der Punktwolke ist nicht nötig, da die Baumobjekte durch die Kreischarakteristik ihrer Stammquerschnitte direkt in den Binärbildern identifiziert werden. Zunächst wird die Punktwolke in drei Rasterbilder aus extrahierten Schichten in definierten Höhen in den zweidimensionalen Raum reduziert: zwei Binärbilder und ein Grauwertbild.

Das erste Binärbild wird im Folgenden „BHD-Binärbild“ genannt und wird schwellwertbasiert aus dem Brusthöhenbereich der Punktwolke zwischen 1,2 m und 1,4 m Höhe erstellt. Die Schichtdicke von 20 cm wird bewusst im Vergleich zu SIMONSE et al. (2003) und WEISER et al. (2022) relativ dick gewählt, damit die Stammquerschnitte auch aus Punktwolken mit geringer Punktdichte klare Kreisstrukturen abbilden. Das zweite Binärbild wird aus der Punktwolkenschicht zwischen 0,4 m und 1,4 m Höhe erstellt, wodurch der Großteil der Stammlänge der Bäume abgedeckt wird und es somit als „Stamm-Binärbild“ bezeichnet wird. In beiden Binärbildern werden alle größeren Cluster entfernt und kreisförmige Strukturen zur Segmentierung der Bäume mittels zirkulärer Hough-Transformation detektiert. Dabei zeichnen sich nicht alle kreisförmigen Objekte im BHD-Binärbild auch im Stamm-Binärbild durch die dicker gewählte Schichtdicke als Kreise ab. So werden die Segmentierungsergebnisse aus dem BHD-Binärbild validiert und die Anzahl der im BHD-Binärbild falsch detektierten Bäume wird reduziert. Zusätzlich kann die Segmentierung der Einzelbäume durch Vorwissen über Baumpositionen gestützt werden. Dies hängt vom Anwendungsfall ab, ob ein Baumkataster aktualisiert oder neu generiert werden soll. Aus den Kreisradien der als Bäume klassifizierten Kreise aus dem BHD-Binärbild können die BHD auf 1,3 m Höhe berechnet werden, während die Kreismittelpunkte die 2D-Lagekoordinaten der Bäume ergeben. Um abschließend dreidimensionale Koordinaten zu erhalten, müssen mit Hilfe der Lagekoordinaten die entsprechenden z-Werte aus dem Bodenraster mit medialen z-Werten abgegriffen werden.

Für die Ermittlung der Baumhöhen und Baumkronendurchmesser wird das Grauwertbild eingesetzt. Dieses enthält die Höhenwerte der normalisierten Punktwolke und entspricht somit einem Canopy Height Model (CHM). Es zeigt überwiegend die Baumkronen, da der Boden entfernt wurde. Die zuvor ermittelten Baumpositionen im Bildkoordinatensystem dienen als Seed-Points für das Region-Growing. So wird ausgehend von jeder Baumposition die Ausdehnung der jeweiligen Baumkrone bestimmt und es entsteht eine binäre Baumkronenmaske pro Baum. 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. 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. Zur Verifikation der korrekten Segmentierung von Baumobjekten werden deren spezifische Parameter mittels festgelegter Kriterien geprüft, um ihre Einordnung als Baum sicherzustellen. Hierzu werden überwiegend die Kriterien aus (HURST & GEIGER 2020) angewendet.

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. Darüber hinaus entstehen bei der Bestimmung des BHD Ungenauigkeiten bei schiefen Bäumen, da die Projektion der Punkte in die x-y-Ebene nicht senkrecht zum Baumstamm erfolgt.

Für spezielle Anwendungsszenarien im Zusammenhang mit einem semantischen 3D-Stadtmodell bietet es sich an, das Baumkataster beziehungsweise die gewonnenen Baummetriken in den CityGML-Standard zu konvertieren. Wie auch HURST & GEIGER (2020) gezeigt haben, ist die Umsetzung der 3D-Modellierung der Bäume in CityGML äußerst komplex. Deshalb wurde ein FME-Workflow entwickelt, welcher aus den extrahierten Baumparametern die individuellen SolitaryVegetationObjects im CityGML-Format mit Geometrie erstellt, was ein semantisches 3D-Baumkataster ergibt (Beispielbaumgruppe in Abb. 3). Die gesamte implementierte Methodik wurde in Python bzw. FME umgesetzt und in einem Github-Repository (https://github.com/SabineZa/Automatic_Tree_Cadastre) veröffentlicht.

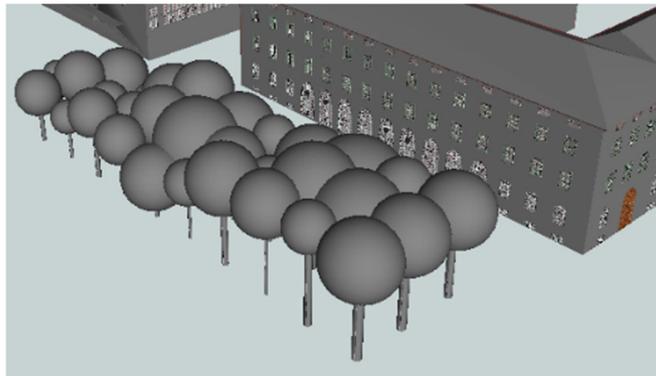


Abb. 3: 3D-modellierte Bäume im CityGML-Format eingebettet in ein 3D-Modell des TUM-Campus (TUM2TWIN 2023)

5 Ergebnisse und Diskussion

Als Ergebnis des automatisierten Verfahrens liegen die aus der Punktwolke extrahierten Baumparameter Position, BHD, Baumhöhe und Kronendurchmesser sowohl tabellarisch als auch als CityGML-Datei mit daraus abgeleiteter Geometrie vor. Zur Untersuchung des entwickelten Verfahrens werden MLS-Punktwolken eines Straßenzugs in der Arcisstraße in München (48,14851° N, 11,56884° O) und PLS-Punktwolken eines rucksackgetragenen Laserscanning-Systems (GOEBEL & IWASZCZUK 2023) aus dem Pasinger Kloostergarten (48,14566° N, 11,45704° O) verwendet. Somit kann die vorgestellte Methodik auf zwei verschiedene urbane Umgebungen mit unterschiedlichen Charakteristiken angewendet werden. Zur Evaluierung der

resultierenden Baumparameter Position, BHD und Baumhöhe wurden in der Arcisstraße Referenzdaten durch herkömmliche Dendrometrie im Rahmen dieser Arbeit (2023) und im Jahr 2021 gewonnen. Für den Pasinger Klostergarten liegen keine Referenzmessungen vor, weshalb bei der Bewertung des Verfahrens nur qualitative Aussagen zu diesem Gebiet getroffen werden können.

5.1 Bewertung der Automatisierung

Die Arbeitsschritte von der Punktwolke bis zu einem parametrischen bzw. 3D-Baumkataster lassen sich mit der Ausnahme von einzelnen von der Punktwolke abhängigen Parametern mit der hier vorgestellten Methodik vollumfänglich automatisieren. Dadurch werden der Arbeits-, Zeit- und Personalaufwand und damit auch die Kosten im Vergleich zur herkömmlich manuellen Vermessung der Bäume wesentlich gesenkt. Für das Testgebiet Arcisstraße kann die entwickelte Methodik inklusive Datenerfassung an einem Arbeitstag und von einer Person bewerkstelligt werden, während die konventionelle Dendrometrie mit anschließender Auswertung mindestens zwei Arbeitstage sowie zwei Personen erfordert. Je größer das Gebiet, desto größer wird der Einsparungseffekt durch das automatisierte Verfahren.

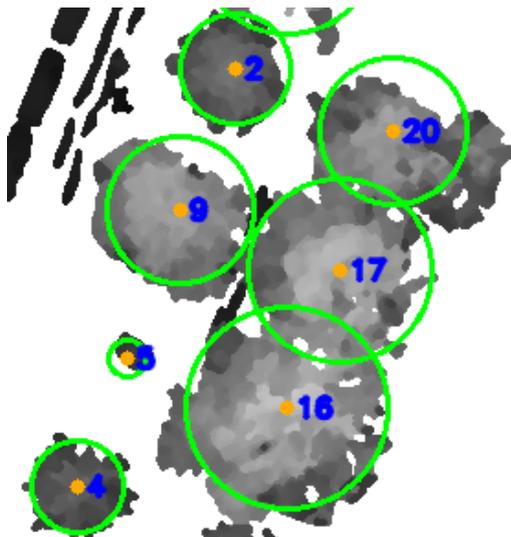


Abb. 4: CHM mit überlagerten automatisch ermittelten Baumstandorten und Kronendurchmessern in der Arcisstraße (Ausschnitt)

5.2 Evaluierung der Baumparameter im Testgebiet Arcisstraße

Für das Testgebiet Arcisstraße zeigt Abb. 5 exemplarisch für den nördlichen Teil eine zusammenfassende Visualisierung der Ergebnisse. Die automatisch ermittelten Baumpositionen, dargestellt als gelbe Kreise, können zu den Referenzpositionen von 2021 (manuell aus der Punktwolke ermittelt) und 2023 (tachymetrisch bestimmt) verglichen werden. Die Referenzmessungen sind jeweils als Kreuze dargestellt, die Nummerierung der Bäume erfolgte nach der Anordnung der Baumreihen. Unter Berücksichtigung der medialen absoluten Abweichung von 4 cm zur Referenzmessung im gesamten Testgebiet Arcisstraße (Tab. 1), lassen sich die automatisch ermittelten Baumpositionen im Kontext eines Baumkatasters als ausreichend genau bewerten. Außerdem gibt der Durchmesser der gelben Baumpunkte in Abb. 5 Aufschluss über den jeweiligen BHD, wobei hier ein Vergrößerungsfaktor von 3 zur Visualisierung verwendet

wurde. Wie Tab. 1 zeigt, kann der BHD im Median der absoluten Abweichung zur Referenzmessung auf 19 cm genau bestimmt werden, was die geforderte Genauigkeit der LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN (2023) von 5 cm nicht erfüllt. Sie kann lediglich in 11 % der Fälle erreicht werden. Dagegen wird die Genauigkeitsanforderung an die Baumhöhen von 1 m (LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN 2023) im Median mit 45 cm erfüllt. Für den automatisch ermittelten mittleren Kronendurchmesser gibt es keine Referenzdaten, weshalb er lediglich visuell beurteilt werden kann. Er ist sowohl in Abb. 5 als auch in Abb. 4 für jeden Baum als Kreis dargestellt. Vor allem Abb. 4 bestätigt, dass die Baumkronenausdehnung im Allgemeinen gut erfasst wird.

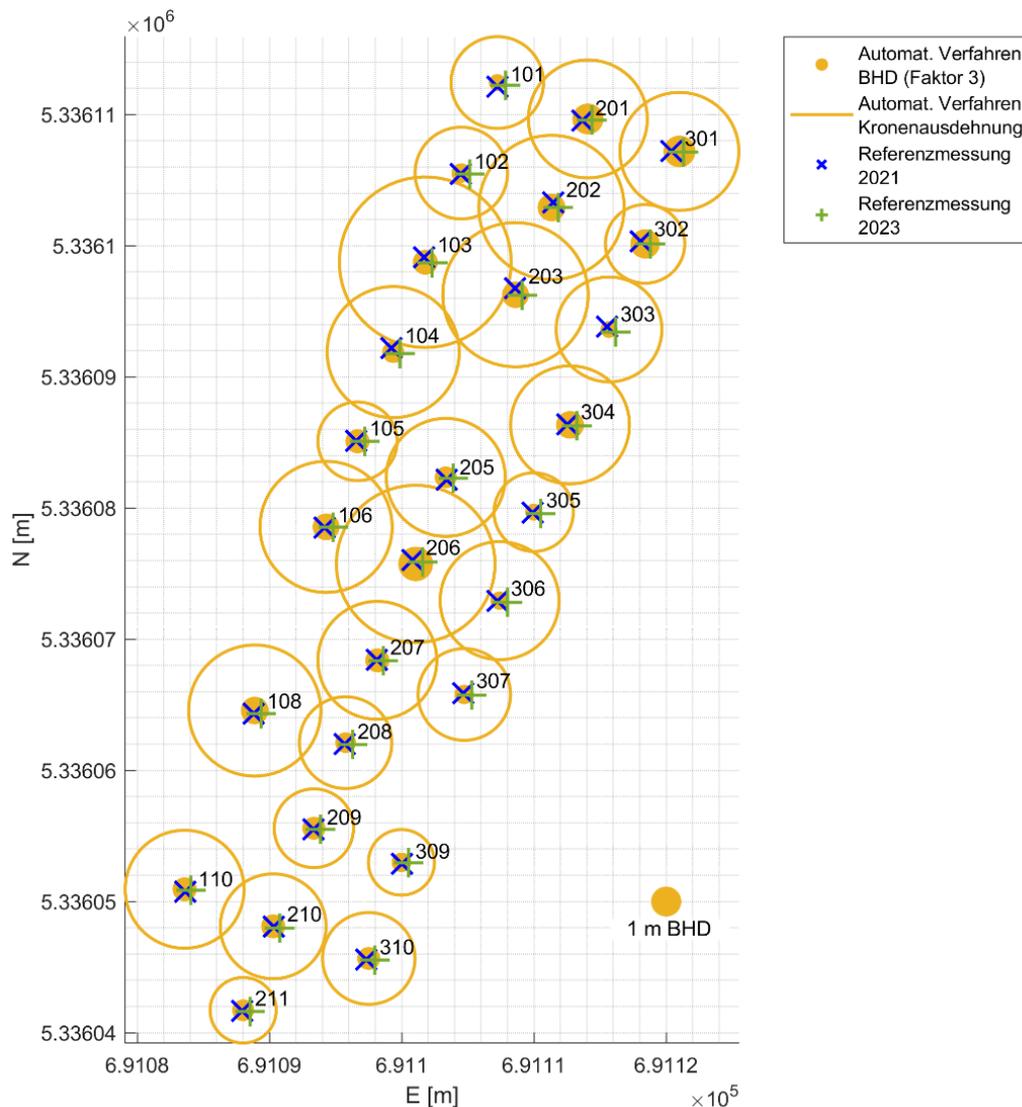


Abb. 5: Ergebnisdarstellung für das Testgebiet Arcisstraße Nord. Die jeweiligen automatisch ermittelten Baumpositionen sind als gelbe Punkte dargestellt, wobei die Punktgröße den Brusthöhendurchmesser repräsentiert. Die umfassenden gelben Kreise stellen maßstabsgetreu den Kronendurchmesser dar. Zum Vergleich die Referenzmessungen von 2021 (blaue Diagonalkreuze) und von 2023 (grüne Kreuze). Fehlerhaft als Baum segmentierte Objekte wurden entfernt

Zu beachten ist, dass die Daten aus paralleler Vorbeifahrt nordwestlich der Baumreihen aufgenommen wurden. Somit sind die Bäume in der dritten Reihe (Südosten) von den vorderen Reihen teilweise verdeckt. Dennoch können Parameter ermittelt werden, was jedoch nur im nichtbelaubten Zustand möglich ist. Zudem beeinträchtigt die Aufnahmekonfiguration die Abbildung der Baumstämme in den Binärbildern, da sie dort oft nur halbmondförmig erscheinen. Dies beeinflusst insbesondere die Ermittlung der BHD. Für die numerische Beurteilung wird hier auf den Median zurückgegriffen, da er nicht durch einzelne große Abweichungen beeinflusst wird. Das wird zum Beispiel an der maximalen Baumhöhenabweichung in Tab. 1 deutlich. In diesem Fall wurde aufgrund einer Fehlzuordnung die Baumkrone eines benachbarten Baumes zur Baumhöhenbestimmung verwendet.

Tab. 1: Minimum, Maximum und Median der absoluten Abweichungen für die Baumparameter Lage und Baumhöhe im Vergleich zu den Referenzmessungen 2021 und BHD im Vergleich zu den Referenzmessungen 2023 für das Testgebiet Arcisstraße

Baumparameter	Lage	BHD	Baumhöhe
Minimale absolute Abweichung	0 cm	2 cm	2 cm
Maximale absolute Abweichung	57 cm	52 cm	849 cm
Median der absoluten Abweichungen	4 cm	19 cm	45 cm

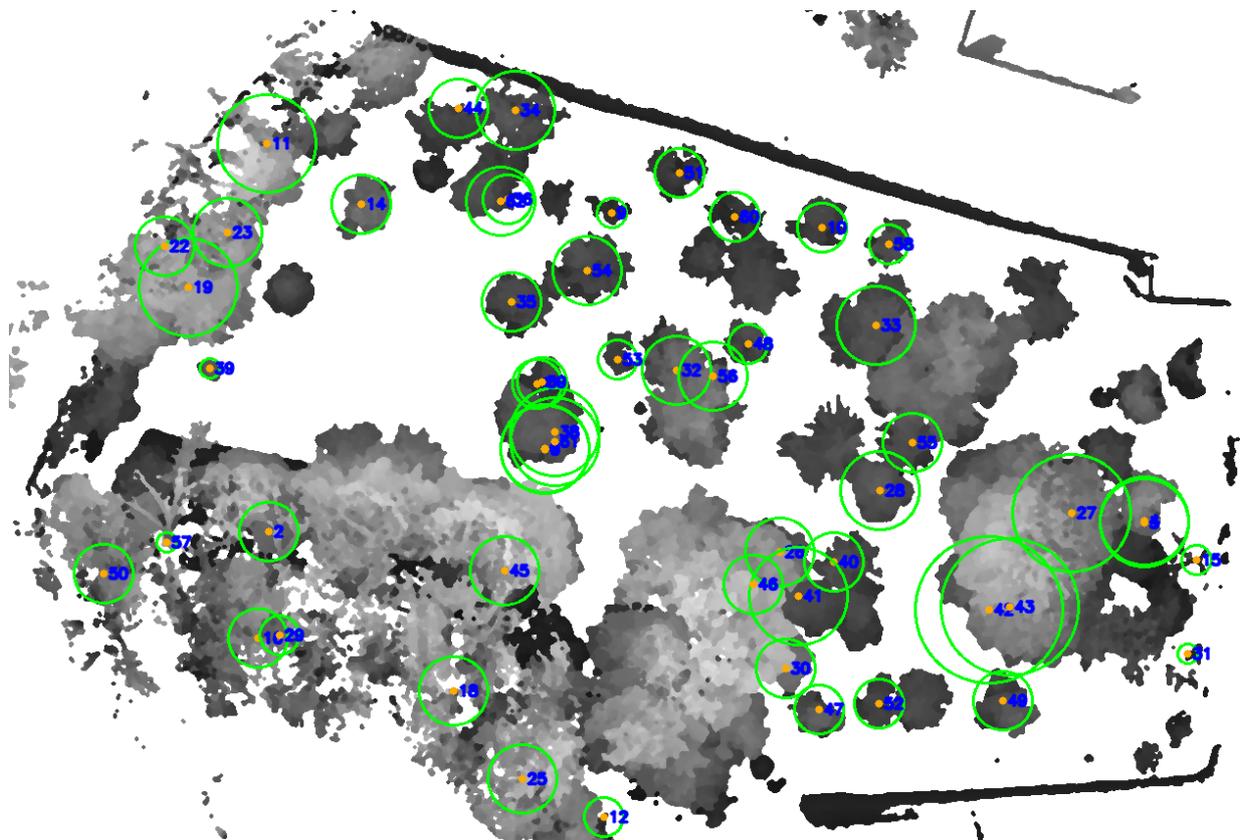


Abb. 6: CHM mit überlagerten automatisch ermittelten Baumstandorten und Kronendurchmessern im Pasinger Kloostergarten

5.3 Qualitative Bewertung der Ergebnisse im Pasinger Klostergarten im Vergleich zum Testgebiet Arcisstraße

Für das Testgebiet im Pasinger Klostergarten gibt es im Unterschied zum Testgebiet Arcisstraße zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung keine Referenzdaten. Es ist lediglich die Anzahl der Bäume bekannt. Deshalb können nur qualitative und visuell vergleichende Aussagen getroffen werden. Abb. 6 zeigt das CHM mit den überlagerten automatisch gewonnenen Ergebnissen aus den PLS-Punktwolken. Es fällt auf, dass im Vergleich zur Arcisstraße in Abb. 4 die Korrektheit und Vollständigkeit der Segmentierung schlechter sind. Dies liegt daran, dass der Pasinger Klostergarten für die entwickelte Methodik ein schwierigeres Gelände darstellt. Die Bäume stehen überwiegend in engen Gruppen zusammen, was sowohl die Segmentierung als auch die Bestimmung der Baumkronendurchmesser deutlich erschwert. Zusätzlich sind die Baumgruppen teilweise im bodennahen Bereich durch niedrige Vegetation bewachsen, was das Segmentierungsergebnis beeinflussen kann. Darüber hinaus beeinflusst die Qualität der aufgenommenen Punktwolken das Ergebnis, wobei die Punktwolken aus dem Pasinger Klostergarten (Rucksacksystem) verrauschter sind als die Punktwolken aus der Arcisstraße (fahrzeuggestütztes MLS).

6 Fazit und Ausblick

Die entwickelte Methodik demonstriert die Möglichkeit der automatisierten Generierung eines Baumkatasters aus Punktwolken in unterschiedlichen urbanen Umgebungen. Dabei erweist sich diese Vorgehensweise als effizienter im Vergleich zur konventionellen Erstellung eines Baumkatasters und ist weitestgehend unabhängig vom Aufnahmesystem. Hierbei gibt es noch Potential für weitere Forschung und die Anwendung alternativer Algorithmen und Methoden, insbesondere bei der Ermittlung der BHD oder der Korrektheit und Vollständigkeit der Segmentierung. Jedoch liegt der Fokus der Problemstellung auf der Realisierung des automatisierten Verfahrens. Hier wurden bewusst klassische Ansätze gewählt, um im ersten Schritt ein Konzept und eine prototypische Realisierung der automatisierten Erstellung eines Baumkatasters zu erlangen.

Durch die Bereitstellung eines dreidimensionalen Baumkatasters wird dieses in Kombination mit einem Digitalen Zwilling zu einem wertvollen Planungs- und Analysewerkzeug. Mit dem Erscheinen zukünftiger CityGML-Versionen oder durch Verwendung alternativer Datenformate eröffnet sich Optimierungspotential hinsichtlich der komplexen und aufwendigen 3D-Modellierung von Bäumen in CityGML.

7 Literaturverzeichnis

ASCHOFF, T., THIES, M., WINTERHALDER, D., KRETSCHMER, U. & SPIECKER, H., 2004: Automatisierte Ableitung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., **13**, 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.
- BIENERT, A., SCHELLER, S., KEANE, E., MULLOOLY, G. & MOHAN, F., 2007: Automatische Erfassung forstinventurrelevanter Geometrieparameter von Waldbäumen aus terrestrischen Laserscannerdaten. Photogrammetrie-Laserscanning-Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, Luhmann, T. & Müller, C. (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 216-225.
- GOEBEL, M. & IWASZCZUK, D., 2023: Backpack System for Capturing 3D Point Clouds of Forests. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **X-1(W1-2023)**, 695-702.
- HACKENBERG, J., SPIECKER, H., CALDERS, K., DISNEY, M. & RAUMONEN, P., 2015: SimpleTree - An Efficient Open Source Tool to Build Tree Models from TLS Clouds. Forests, **6**(11), 4245-4294.
- HIRT, P.-R., 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, P.-R., 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.
- HURST, J. & GEIGER, A., 2020: Automatisierte Generierung eines 3D-Baumkatasters am Beispiel des KIT Campus Nord. 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, 65-73.
- KUNZ, D. & GEIGER, A., 2018: Automatisierte Generierung eines 3D-Baumkatasters am Beispiel des KIT Campus Nord. Tagungsband 30. Forum Bauinformatik: von jungen Forschenden für junge Forschende, 217-224.
- 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=InvitationToTende>, letzter Zugriff 25.04.23.
- PÉREZ-MARTÍN, E., LÓPEZ-CUERVO MEDINA, S., HERRERO-TEJEDOR, T., PÉREZ-SOUZA, M.-A., AGUIRRE DE MATA, J. & EZQUERRA-CANALEJO, A., 2021: Assessment of Tree Diameter Estimation Methods from Mobile Laser Scanning in a Historic Garden. Forests, **12**(8), 1013.
- RAUMONEN, P., KAASALAINEN, M., ÅKERBLUM, M., KAASALAINEN, S., KAARTINEN, H., VASTARANTA, M., HOLOPAINEN, M., DISNEY, M. & LEWIS, P., 2013: Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. Remote Sensing, **5**(2), 491-520.
- SAFAIE, A.-H., RASTIVEIS, H., SHAMS, A., SARASUA, W.-A. & 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.

- 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.
- TUM2TWIN, 2023: Github Repository des tum2twin-Datensatzes. Arbeitskreis TUM-Playground. <https://github.com/tum-gis/tum2twin>, letzter Zugriff 24.11.23.
- WEISER, H., SCHÄFER, J., WINIWARTER, L., KRAŠOVEC, N., FASSNACHT, F.-E. & 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, P.-W., 2015: Tree and Forest Measurement. Cham: Springer International Publishing, 3. Edition.
- YAZDI, H., SHU, Q., RÖTZER, T., PETZOLD, F. & LUDWIG, F., 2024: A Multilayered Urban Tree Dataset of Point Clouds, Quantitative Structure and Graph Models. Scientific Data, **11**, 28.
- 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), 501.
- ZINTL, T., 2021: Lokalisierung und Visualisierung urbaner Bäume aus MLS-Punktwolken. Bachelor's Thesis, Technische Universität München, Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung.