



Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 801

Sabine Hofmann

**Potential von LiDAR Mobile Mapping
für hochgenaue Karten**

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325

ISBN 978 3 7696 5213 0

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 334, Hannover 2017



Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 801

Potential von LiDAR Mobile Mapping für hochgenaue Karten

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Sabine Hofmann

Geboren am 06.08.1983 in Göppingen

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325

ISBN 978 3 7696 5213 0

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 334, Hannover 2017

Adresse der DGK:



Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München
Telefon +49 – 331 – 288 1685 • Telefax +49 – 331 – 288 1759
E-Mail post@dgk.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Prüfungskommission:

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Sester

Referent: apl. Prof. Dr.-Ing. Claus Brenner

Korreferenten: Prof. Dr. Andreas Nüchter (Universität Würzburg)
Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 23.05.2017

© 2017 Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

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

Abstract

This work deals with the evaluation of terrestrial mobile LiDAR point clouds (LiDAR mobile mapping) generating highly accurate maps. As a possible user scenario the landmark-based localization of vehicles is discussed. Vehicles are using different sensors to capture their environment, in order to use street furniture such as lamp posts or traffic lights for positioning. The accuracy of the given map is a decisive factor for the quality of the localization. The basics in this work include an introduction to the subjects of mobile mapping, direct georeferencing using global satellite navigation systems and inertial navigation systems, the geometric basics of mobile laserscanning and the used point cloud data. Methods of point cloud alignment and algorithms for object detection in point clouds and a literature review of various methods for accuracy analysis of mobile mapping point clouds and procedures for correcting these point clouds described complete the basics.

The main contributions of this work are two methods for accuracy analysis and a procedure correcting mobile mapping point clouds. The approaches partly use reference data. Therefore various data sources, e.g. nationwide available maps from the national surveying and mapping agencies and a highly accurate reference test field collected using a total station, are discussed as reference. The accuracy is analyzed using a point cloud based and an object based method. The point cloud based method uses an iterative algorithm finding corresponding points in point clouds of different epochs in order to determine the translation between these point clouds. Since the accuracy in a mobile mapping point cloud varies locally caused by GNSS effects a single rigid transformation is not sufficient. Therefore, point clouds are separated in tiles and the translation between the different epochs is calculated for each tile as an accuracy measure. This work also examines the effects of the tile size on the results. The object based method uses segmented features for accuracy analysis. Therefore, cylindrical and planar objects are segmented automatically in the point clouds. Using reference data, the accuracy of the segmentation algorithm as well as the accuracy of the point cloud data is evaluated. Beside a relative analysis between multiple epochs, additional external reference data enables an absolute statement of accuracy. The results of both approaches show differences of several Centimeters to Decimeters between point clouds from different epochs, which vary locally within the project area. Higher accuracies can only be reached by correcting the point clouds. In this work a strip adjustment approach is used minimizing the residuals between mobile mapping point clouds and highly accurate reference data. The adjustment estimates position and orientation corrections along the trajectory at equidistant anchor points, based on the residuals between the LiDAR point cloud and the reference data. Various experiments evaluate the approach and the required number and distribution of reference data. Therefore, the reference data was split in control and check points, using only control points to estimate the correction. Uniformly distributed reference points provide the best results, whereas reference points only at cross sections cannot fully reduce the impact of the GNSS-effects on the accuracy of the mobile mapping point clouds.

Keywords: LiDAR Mobile Mapping, strip adjustment, highly accurate reference data

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Evaluation von mobilem terrestrischen Laserscanning (LiDAR Mobile Mapping) zur Erstellung hochgenauer Karten. Ein mögliches Szenario zur Anwendung stellt die Lokalisierung von Fahrzeugen dar, die ausgestattet mit Sensoren zur Umgebungserfassung, vorhandene Infrastruktur-Objekte entlang von Straßen als Landmarken zur Positionsbestimmung nutzen. Die Genauigkeit der Kartenbasis ist ein entscheidender Faktor für die Qualität der Lokalisierung. Die Grundlagen der Arbeit enthalten dazu eine Einführung in die Themen Mobile Mapping, direkte Georeferenzierung mittels Globalen Navigationssatelliten-Systemen und inertialen Messverfahren, die Geometrie der Datenerfassung und die erzeugten Daten. Verfahren zur gemeinsamen Georeferenzierung in großen Projektgebieten, Algorithmen zur Objektdetektion in Punktwolken und ein Überblick über Verfahren der Literatur zu den Themen Genauigkeitsanalyse von Mobile Mapping Punktwolken, der Verbesserung dieser Punktwolken und zur Auswahl und Verteilung von Passpunkten zur globalen Georeferenzierung ergänzen die Grundlagen.

Den Hauptteil der Arbeit bilden zwei Verfahren zur Genauigkeitsanalyse sowie ein Ansatz zur Verbesserung der mobil erfassten Punktwolken. Die Ansätze erfordern teilweise Referenzdaten. Daher werden verschiedene Datenquellen, z. B. das flächendeckend verfügbare Kartenmaterial amtlicher Daten und ein mittels Tachymeter erfasstes, hochgenaues Referenzpunktfeld, als mögliche Referenz untersucht. Die Genauigkeit der Mobile Mapping Punktwolken wird anhand einer punktwolkenbasierten und einer objektbasierten Methode analysiert. Das erste Verfahren nutzt einen iterativen Ansatz zur Suche benachbarter Punkte in unstrukturierten Punktwolken, um die Verschiebung zwischen zwei Punktwolken aus unterschiedlichen Epochen zu ermitteln. Da die Genauigkeit der Punktwolken aufgrund von GNSS-Effekten lokal variieren kann, sind innerhalb der Projektgebiete verschiedene Transformationsparameter erforderlich. Dazu werden die Punktwolken in Kacheln unterteilt und die Verschiebung zwischen den Punktwolken für jede Kachel separat bestimmt. Die Arbeit untersucht auch die Effekte unterschiedlicher Kachelgrößen auf das Ergebnis der Analyse. Das zweite Verfahren nutzt segmentierte Objekte zur Analyse der Genauigkeit. Dazu werden aus den Punktwolken automatisch Zylinder und Ebenen segmentiert. Unter Verwendung von Referenzdaten wird sowohl die Genauigkeit der Algorithmen zur Segmentierung als auch die Genauigkeit der Punktwolken ausgewertet. Liegen Punktwolken aus unterschiedlichen Epochen vor, kann eine relative Auswertung zwischen den Epochen erfolgen. Zusätzliche externe Referenzdaten für die segmentierten Objekte ermöglichen eine absolute Analyse. Die Ergebnisse zeigen Differenzen von mehreren Zentimetern bis Dezimetern zwischen unterschiedlichen Epochen bzw. zu den Referenzdaten, die innerhalb der Projektgebiete zusätzlich lokalen Schwankungen unterliegen. Ist die Genauigkeit der erfassten Punktwolken nicht ausreichend, wird eine Verbesserung der Daten erforderlich. Diese wird in der vorliegenden Arbeit in einer streifenbasierten Ausgleichung zur Minimierung der quadratischen Abweichung zwischen einem hochgenauen Referenzpunktfeld und den Punktwolken erreicht. Entlang der Trajektorie werden gleichabständige Ankerpunkte gewählt und Korrekturwerte an diesen Positionen aus den Korrespondenzen zwischen Referenz und LiDAR-Punkten ermittelt. Verschiedene Experimente evaluieren den Ansatz der Ausgleichung sowie die benötigte Anzahl und Verteilung der Referenzdaten. Dazu wurde die Ausgleichung jeweils nur mit einem Teil der Referenzdaten durchgeführt und die übrigen Punkte als Kontrollpunkte genutzt. Eine gleichmäßige Verteilung der Referenzpunkte über das Testgebiet liefert sehr gute Ergebnisse für das untersuchte Gebiet. Referenzpunkte ausschließlich an Kreuzungen können die Auswirkungen der GNSS-Effekte auf die Genauigkeit der Punktwolken dagegen nicht vollständig reduzieren.

Schlagerworte: LiDAR Mobile Mapping, streifenbasierte Ausgleichung, hochgenaue Referenzdaten

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	7
1.1. Motivation	7
1.2. Ziel der Arbeit	9
1.3. Gliederung	10
2. Grundlagen	13
2.1. Einführung und Definition von Mobile Mapping	13
2.2. Direkte Georeferenzierung	14
2.3. Laserscanner zur Umgebungserfassung	20
2.4. Geometrie kinematischer LiDAR-Systeme	22
2.5. Mobile Mapping Systeme	24
2.6. Umgebungsdaten als Scanstreifen und Punktwolken	26
2.7. Ausgleichung georeferenzierter Punktwolken	29
2.8. Segmentierung von Objekten	37
3. Stand der Forschung	43
3.1. Genauigkeitsanalyse von Mobile Mapping Punktwolken	43
3.2. Verbesserung von Mobile Mapping Punktwolken	45
4. Hochgenaue Karten	51
4.1. Verfügbare Geodaten	51
4.2. Ein hochgenaues Referenzpunktfeld	53
4.3. Analyse der verfügbaren Karten	56
4.4. Positionierung von Fahrzeugen mittels Landmarken-Karten	60
4.5. Diskussion	66
5. Genauigkeitsanalyse von Mobile Mapping Punktwolken	69
5.1. Punktwolkenbasierter Ansatz	69
5.2. Objektbasierter Ansatz	76
5.3. Zusammenfassung der Ergebnisse	85
6. Streifenbasierte Ausgleichung von Mobile Mapping Punktwolken	87
6.1. Ansatz zur Ausgleichung von Scanstreifen	87
6.2. Auswahl geeigneter Referenzpunkte	93
7. Experimente und Evaluation zur streifenbasierten Ausgleichung	95
7.1. Ausgleichung der Scanstreifen mit vollständiger Referenz	96

7.2. Ergebnisse mit gleichmäßig reduzierten Referenzpunkten	103
7.3. Ergebnisse mit Referenzpunkten in einem Raster	106
7.4. Ergebnisse mit Referenzpunkten an Kreuzungen	108
7.5. Diskussion der Ergebnisse	112
8. Zusammenfassung und Ausblick	117
A. Laserscanner und Mobile Mapping Systeme	121
B. Ergebnisse für eine Epoche mit vollständigen Referenzdaten	125
C. Ergebnisse für reduzierte Referenzdaten-Auswahl	129
Abbildungsverzeichnis	135
Tabellenverzeichnis	137
Literaturverzeichnis	139
Lebenslauf	145
Danksagung	146

1. Einführung

1.1. Motivation

Hochgenaue, detaillierte Karten der Umgebung - unter Schlagworten wie „high definition maps“ (Here¹), „high-precision maps“ (Daimler AG²) oder „high-end 3D maps“ (Continental AG³) - sind ein wichtiger Baustein für autonome Fahrzeuge im Straßenverkehr. Die Bedeutung der Karte lässt sich anhand der folgenden Beispiele verdeutlichen: Die vollständig autonome „Berta Benz Fahrt“ einer Mercedes-Benz S-Klasse im Jahr 2013 von Mannheim nach Pforzheim nutzte zur Lokalisierung eine digitale Karte (Ziegler u. a., 2014). Ende 2015 kauften die drei deutschen Automobilhersteller Audi AG, BMW Group und Daimler AG den Kartendienst Nokia Here⁴, um die Informationen der Karte mit den Sensordaten der Fahrzeuge zu fusionieren und die Fahrzeuge dadurch intelligenter zu machen⁵. Ab 2017 sollen von der Frontkamera der Fahrzeuge erfasste Daten Informationen zum Verkehrsfluss, zu Baustellen oder Verkehrszeichen in den Kartendienst weitergeben und damit die *Open Location Platform* in Echtzeit aktualisieren⁶.

Mit einer geeigneten Karte und Sensoren zur Umgebungserfassung - Kameras, Laserscanner oder Radar, die in aktiven Fahrerassistenzsystemen etwa zur Kollisionswarnung eingesetzt werden - kann ein Fahrzeug die eigene Position berechnen, wenn in der Umgebung ausreichend viele Kartenobjekte detektiert werden. Im Unterschied zu den heute genutzten Navigationssystemen in Fahrzeugen, die sich an herkömmlichen Karten für menschliche Betrachter orientieren, benötigen Fahrzeuge jedoch andere Inhalte, um diese mit den vorhandenen Sensoren zu erfassen und zu verarbeiten. Pandazis (2002) untersuchte im *NextMAP*-Projekt die Bedingungen an eine solche zukünftige digitale Karte, die besondere Anforderungen an die Erfassung stellt. Das Projekt *Enhanced Digital Mapping* (EDMap, 2004) untersuchte anschließend die Möglichkeiten zur kommerziellen Herstellung solcher Karten, abhängig von der geforderten Positionierungsgenauigkeit der unterschiedlichen Anwendungen im Straßenverkehr. Der neu entwickelte Kartenstandard NDS (Navigation Data Standard⁷) für den Einsatz im Automobilbereich, der von vielen Firmen der Branche getragen wird, stellt Kartendaten mit umfangreichen Objekten und Zielsetzungen bereit. Der NDS enthält z. B. hochgenaue dreidimensionale Fahrbahngeometrien, mit Mittellinie und Begrenzung der Fahrbahnen sowie Art und Material der Fahrbahnbegrenzung, Informationen über die Fahrbahnmarkierungen, weitere Attribute wie Ampeln oder Parkplätze (Navigation Data Standard (NDS) e.V., 2016).

¹<http://360.here.com>

²www.mercedes-benz.com

³www.2025ad.com

⁴Pressemitteilung vom 04.12.2015, <http://company.nokia.com/en/news/press-releases>, abgerufen am 19.08.2016

⁵Alle gegen Google, M. Fasse, Artikel vom 07.12.2015 auf www.handelsblatt.com, abgerufen am 30.09.2016

⁶HERE unveils next generation real-time data services for automotive industry, Pressemitteilung vom 26.09.2016, <https://here.com/en/company/newsroom/press-releases>, abgerufen am 30.09.2016

⁷<http://www.nds-association.org/>

Die Entwicklung kinematischer Messsysteme, ausgestattet mit unterschiedlichen Sensoren zur Digitalisierung der Umgebung, stellte einen großen Fortschritt bei der Erfassung von Geodaten dar. Mobile Mapping Systeme nehmen Geodaten entlang von Straßen, Bahnstrecken oder Flüssen und Kanälen mit Laserscannern, Kameras oder Radar auf. Die Umgebung kann damit viel schneller als bei stationären Verfahren und mit hoher Auflösung und Dichte dreidimensional erfasst werden. Objekte, die von den Sensoren autonomer Fahrzeuge ausgewertet werden können, werden ebenfalls erfasst und können für Karten aufbereitet werden. Die erforderliche Reichweite der Sensoren ist auf wenige hundert Meter beschränkt, da meist die direkte Umgebung der Strecke aufgenommen werden soll. Schnellere Computersysteme und praktisch unlimitierte Kapazitäten von Speichermedien unterstützen den Prozess der Datenerfassung. Zur automatisierten Verarbeitung und Analyse der Daten wurde zudem eine Vielzahl von Algorithmen entwickelt, die in freien Softwarebibliotheken zur Verfügung stehen, und die es ermöglichen, die Daten für die gewählte Anwendung unter gegebenen Anforderungen zu verarbeiten.

Neben der Generierung hochgenauer Karten für autonome Fahrzeuge finden sich viele weitere Anwendungsgebiete für kinematisch erfasste Geodaten. Die Daten bieten eine günstige und schnelle Möglichkeit zur Aktualisierung herkömmlicher Karten, z. B. für Navigationssysteme. Für Kommunen bietet sich die zeitsparende Erfassung der Straßeninfrastruktur oder zur detaillierten Kartierung von Schäden an der Infrastruktur an. Weitere Einsatzgebiete sind die Vermessung von Brückenbauwerken oder die Überprüfung des Lichtraumprofils entlang von Bahntrassen. Verschiedene Fachtagungen zum Thema Mobile Mapping beschäftigen sich neben der Technologie, die auch von kommerziellen Herstellern ständig weiter entwickelt wird, mit möglichen Anwendungen mobil erfasster Geodaten, etwa die Fachtagung Mobile Mapping 2013 in Muttenz⁸ oder das alle zwei Jahre organisierte Internationale Symposium der Mobile Mapping Technologie (2015 in Sydney⁹ und 2017 in Kairo¹⁰). Werkzeuge zur Verifizierung der Genauigkeit und Vollständigkeit der Daten, abhängig von den gestellten Anforderungen, sind erforderlich, wenn Geodaten als Dienstleistung verkauft werden, eine definierte Genauigkeit der Daten erfüllt werden muss oder hohe Qualitätsanforderungen an die erfassten Daten gestellt werden. Eine solche Bewertung der Datenqualität kann z. B. mit Hilfe von Referenzdaten hoher Genauigkeit erfolgen. Als Referenzdaten kommen Daten aus anderen Datenquellen in Frage, die für einen Vergleich mit Mobile Mapping Punktwolken geeignet sind, das heißt die Objekte der Referenz haben in den Punktwolken ein definiertes, segmentierbares Korrespondenzobjekt. Bereits verfügbare Datenquellen, z. B. Daten aus hoheitlicher Vermessung, müssen auf ihre Eignung untersucht werden. Stehen keine Daten zur Verfügung oder sind die Genauigkeitsanforderungen höher, müssen zusätzlich geeignete Daten erzeugt werden.

Genügt die erreichte Genauigkeit der erfassten LiDAR Mobile Mapping Punktwolken nicht den gestellten Anforderungen, müssen die Punktwolken verbessert werden. Ein Maß für die erforderliche Verbesserung kann die Distanz zwischen korrespondierenden Punkten unterschiedlicher Aufnahme-Epochen oder die Distanz zu Referenzobjekten sein. In einer Ausgleichung kann dann die Korrektur der Punktwolken bestimmt werden. Bieten die Mobile Mapping Daten eine Verbindung zwischen Trajektorie und Punktwolke, z. B. anhand der Zeitstempel, wird im Rahmen der Ausgleichung

⁸www.3dgi.ch/mm2013/

⁹www.mmt2015.org/

¹⁰<http://mmt2017.aast.edu/>

der Punktwolken eine Verbesserung der Trajektorie erreicht. Bei der Verwendung von Referenzdaten muss untersucht werden, wie viele Referenzobjekte erforderlich sind und wie diese in einem Projektgebiet verteilt sein müssen, um die geforderte Genauigkeit zu erreichen.

1.2. Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine umfassende Evaluation von LiDAR Mobile Mapping Punktwolken, um das Potential der Daten zur Erstellung hochgenauer Karten zu ermitteln. Diese Fragestellung lässt sich in zwei Teilbereiche trennen: Die Genauigkeitsanalyse der Punktwolken und die geometrische Verbesserung der Daten. Untersucht werden die Daten eines kommerziellen Mobile Mapping Systems, in dem ein Zugriff auf die Rohdaten und auf die internen Prozesse der Sensoren zur Umgebungserfassung und Georeferenzierung von außen nicht möglich ist. Die Auswertung der Trajektorie erfolgt als *Black Box* in lizenzierte Software. Die Ausgangsbasis der Experimente in dieser Arbeit sind LiDAR-Messungen als Scanstreifen oder Punktwolken und die offline ausgewerteten Trajektorien. Die beiden resultierenden Teilaufgaben werden im Folgenden definiert:

1. **Genauigkeitsanalyse der LiDAR Mobile Mapping Punktwolken:** Die vorliegende Arbeit nutzt zwei Methoden zur Genauigkeitsanalyse von Punktwolken. Die Analyse der Daten erfolgt als Vergleich zwischen Mobile Mapping Punktwolken unterschiedlicher Epochen ohne Referenz sowie anhand von unabhängigen Referenzdaten in einem globalen Koordinatensystem, da die Genauigkeit der Punktwolken in hohem Maße von der direkten Georeferenzierung des Mobile Mapping Systems mit globaler Satellitennavigation (GNSS) und den genutzten Sensoren zur inertialen Navigation (INS) abhängt. Die Verarbeitung der Daten erfolgt weitgehend mit Standardalgorithmen, etwa zur Segmentierung von zylindrischen Objekten und Ebenen. Eine Bewertung der Verfahren zur Segmentierung wird anhand von manuell generierten Referenzdaten durchgeführt. Zusätzlich werden unterschiedliche Datenquellen auf eine Eignung als Referenzdaten untersucht. In Deutschland liegen flächendeckend Daten der staatlichen Vermessungsverwaltungen vor, hierzu wird untersucht, inwieweit diese als Referenz für Mobile Mapping Punktwolken genutzt werden können. Zusätzlich werden für hochgenaue Analysen Referenzdaten mit einer Genauigkeit in der Größenordnung weniger Millimeter generiert.
2. **Geometrische Verbesserung der Punktwolken mittels Referenzdaten:** Aufgrund der Dynamik eines Mobile Mapping Systems können starre Verfahren zur geometrischen Registrierung von Punktwolken nicht auf die Daten angewendet werden. Die Genauigkeit der direkten Georeferenzierung kann sich aufgrund von Mehrwegeeffekten oder Abschattungen des GNSS-Signals innerhalb kurzer Strecken ändern und erfordert daher verschiedene Transformationsparameter zur Verbesserung der Punktwolken innerhalb eines Projektgebiets. Eine direkte Korrektur der Trajektorie auf Basis der erfassten Punktwolken ist aufgrund der GNSS/INS-Einheit als *Black Box* und proprietärer Datenformate bei kommerziellen Systemen meist nicht möglich. Der Ansatz dieser Arbeit zeigt daher ein Verfahren zur Korrektur der Trajektorie ohne Zugriff auf die Rohdaten der Sensoren zur Georeferenzierung, um die Distanz zwischen den Punktwolken unter Verwendung von Referenzdaten zu minimieren.

Die verschiedenen Bereiche der Arbeit zeigt Abb. 1.1. Die kinematische Erfassung der Punktwolken wird mit einem Mobile Mapping System *RIEGL VMX-250* durchgeführt. Die Analyse der Genauigkeit erfolgt anhand der erzeugten Punktwolken und, im Anschluss an eine Segmentierung, auf Basis von ausgewählten Objekten. Umfangreiche Referenzdaten verifizieren die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse. Die Verbesserung der Punktwolken basiert auf der Ausgleichung der erfassten Scanstreifen unter Verwendung von Referenzdaten, die in einem Testgebiet zur Auswertung der Mobile Mapping Punktwolken erfasst wurden. Im Rahmen dieser Ausgleichung wird auch die Genauigkeit der Punktwolken analysiert.

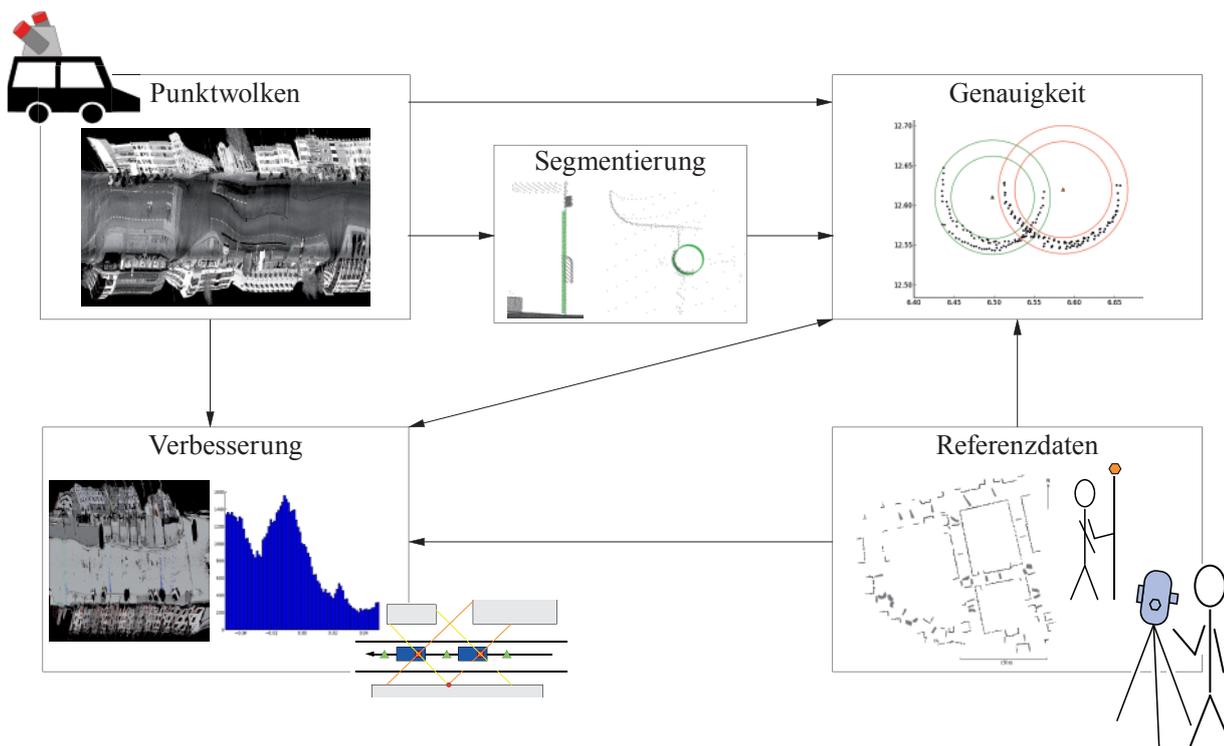


Abbildung 1.1.: Teilbereiche der Arbeit: Genauigkeitsanalyse und Verbesserung von Mobile Mapping Punktwolken unter Verwendung von Referenzdaten.

1.3. Gliederung

Der Hauptteil der vorliegenden Arbeit zur Untersuchung des Potentials hochgenauer Karten aus LiDAR Mobile Mapping gliedert sich in vier Teile. Zu Beginn werden die benötigten Grundlagen (Kapitel 2) und der aktuelle Stand der Forschung (Kapitel 3) vorgestellt. Die Grundlagen umfassen die Themenbereiche der Datenerfassung mit mobilen Systemen, die Daten selbst, Verfahren zur Registrierung von Geodaten sowie Algorithmen zur Verarbeitung der in der Arbeit genutzten Punktwolken. Der aktuelle Stand der Forschung zeigt Lösungen aus der Literatur zur Genauigkeitsanalyse von Mobile Mapping Daten sowie zur Verbesserung von Punktwolken, auch unter Verwendung von Passobjekten.

Daran schließt sich eine Diskussion über das Potential von Kartenmaterial aus verschiedenen Quellen für unterschiedliche Anwendungen an (Kapitel 4). Vorgestellt werden Geodaten aus amtlichen

Datenbeständen, z. B. ALKIS, sowie ein terrestrisch erfasster Referenzdatensatz. Anschließend wird die Eignung der amtlichen Daten zur Verbesserung von mobil erfassten Geodaten untersucht (Kapitel 4.3) und die Positionierung von Fahrzeugen als eine mögliche Anwendung hochgenauer Karten simuliert (Kapitel 4.4).

In Kapitel 5 folgt die Analyse der Genauigkeit realer Mobile Mapping Punktwolken. Es werden zwei Ansätze angewendet und anhand der verfügbaren Punktwolken evaluiert. Die erste vorgestellte Methode nutzt unstrukturierte Punktwolken in Kacheln und einen ICP-Algorithmus zur Ermittlung der Genauigkeit (Kapitel 5.1), die zweite Methode basiert auf der Verwendung von segmentierten Objekten (Kapitel 5.2). Die Vor- und Nachteile der beiden Ansätze werden diskutiert.

Die Erzeugung hochgenauer Daten mittels LiDAR Mobile Mapping wird in Kapitel 6 mit einer Methode zur streifenbasierten Ausgleichung von Mobile Mapping Punktwolken vorgestellt. Das Verfahren in dieser Arbeit nutzt ein hochgenaues Referenzpunktfeld für die Ausgleichung der Scanstreifen. Auf Basis verschiedener Experimente wird die Methode in Kapitel 7 evaluiert.

2. Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt die technischen und mathematischen Grundlagen terrestrischer, kinematischer LiDAR-Systeme. Kapitel 2.1 liefert eine kurze Einführung und Definition in das Thema. Kapitel 2.2 erklärt die allgemeinen Grundlagen der Georeferenzierung für Mobile Mapping Systeme auf Basis von satellitengestützten und inertialen Verfahren. Kapitel 2.3 zeigt ausgewählte Laserscanner für den kinematischen Einsatz, die geometrischen Grundlagen der Auswertung werden in Kapitel 2.4 erläutert. In Kapitel 2.5 wird eine Auswahl Mobile Mapping Systeme mit Laserscannern zur Umgebungserfassung vorgestellt, zusätzlich findet sich dort ein Überblick über das in der Arbeit genutzte System. Die verwendeten LiDAR-Daten (Kapitel 2.6) und Verfahren zur gemeinsamen Georeferenzierung von mehreren Punktwolken (Kapitel 2.7) werden im Anschluss diskutiert. Abschließend werden in Kapitel 2.8 Verfahren zur Segmentierung von Objekten vorgestellt.

2.1. Einführung und Definition von Mobile Mapping

Mobile Mapping Systeme sind Messsysteme, die mittels direkter Georeferenzierung und einer Kombination verschiedener zeit-synchronisierter Sensoren („Multi-Sensor-Systeme“) auf einer mobilen (Standard-) Plattform zur schnellen Erfassung von georeferenzierter Umgebungsinformation eingesetzt werden (Schwarz und El-Sheimy, 1996; El-Sheimy, 2005). Ausgehend von der Datenerfassung aus der Luft von Flugzeugen oder Helikoptern aus (z. B. Baltsavias, 1999), haben sich PKW als Plattform zur mobilen Erfassung am Boden etabliert. Übersichten zu terrestrischen Systemen bieten z. B. Ellum und El-Sheimy (2002), Barber u. a. (2008) oder Petrie (2010). Eine Aufteilung in fünf Bereiche nehmen Schwarz und El-Sheimy (1996) zur Definition von Mobile Mapping Systemen vor: Datenerfassung, Synchronisierung und Georeferenzierung, Integration und Datenfusion, Qualitätskontrolle sowie die Optimierung und Automatisierung des Datenflusses. Zur **Datenerfassung** besitzen Mobile Mapping Systeme mehrere Sensoren oder Sensortypen. Zu diesen zählen alle Sensoren zur Positionierung und Orientierung. Die direkte Georeferenzierung basiert auf GNSS, eine Verbesserung der Positionsbestimmung wird durch die Kopplung mit zusätzlichen inertialen Sensoren erreicht. Die Umgebungserfassung erfolgt z. B. über CCD-Kameras, Laserscanner, Radar- oder Ultraschall-Sensoren. Die **Synchronisierung** der Sensoren spielt für die Georeferenzierung eine entscheidende Rolle, um alle erfassten Daten in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren. In der Regel wird ein einheitliches Zeitsignal durch GNSS bereitgestellt und auf alle Sensoren übertragen. Unter **Integration und Datenfusion** sind alle Schritte zusammengefasst, die für das Erreichen des gewünschten Ergebnisses, z. B. der Erzeugung von 3D-Koordinaten aus Sensordaten, erforderlich sind. Generell beinhaltet dies die Integration von Daten aus unterschiedlichen Quellen und unterschiedlicher Art, um ein vielseitiges Hilfsmittel für kartografische Aufgaben zu stellen. Die **Qualitätskontrolle** erfolgt wie in der klassischen Vermessung in zwei Teilen: In Echtzeit während der Datenaufnahmen und in der Nachbearbeitung. In Echtzeit soll erkennbar sein, ob die erfassten Daten die geforderte Genauigkeit mit einer definierten Wahrscheinlichkeit

einhalten. In der Nachverarbeitung muss angegeben werden, wie viele der Messungen die geforderte Genauigkeit tatsächlich erreicht haben. Der Bereich **Optimierung und Automatisierung des Datenflusses** verlangt nach Schwarz und El-Sheimy (1996) ein sehr gutes Verständnis der mathematischen Grundlagen, der Prozess zur Erstellung der Ergebnisse erfordert dennoch ein hohes Maß an menschlicher Interaktion.

Zur Umgebungserfassung werden häufig Laserscanner und Kameras oder eine Kombination dieser Sensoren eingesetzt. Laserscanner, wie in dieser Arbeit, messen die Distanz und Richtung vom Scanner zu einem Zielpunkt und benötigen daher die Position des Scanners als Koordinatenursprung. Im statischen Fall bleibt dieser Bezugspunkt fest, sodass die Messwerte über polares Anhängen an den Standpunkt eine Punktwolke mit lokaler Orientierung liefern. In einer kinematischen Anwendung bewegt sich der Bezugspunkt zwischen den Messungen, die Position des Bezugspunkts muss also zur Berechnung der Punktwolke für jede Messung bekannt sein. Eine wichtige Grundlage für Mobile Mapping Systeme waren daher die Entwicklungen zur direkten Georeferenzierung mittels satellitengestützter Verfahren. Die direkte Georeferenzierung hat den Vorteil, dass die Sensoren zur Positionierung und Orientierung des Systems direkt auf der Plattform integriert sind und die Signale der Satelliten von nahezu jeder beliebigen Position empfangen können. Dadurch entfällt die aufwändige indirekte Georeferenzierung über Anschlusspunkte, wie bei einer Totalstation erforderlich (Ellum und El-Sheimy, 2002). In Kombination mit einer hohen Datenrate ergibt sich ein wesentlich geringerer Zeitbedarf zur Erzeugung von dichten Punktwolken im Vergleich zu statischen Methoden, etwa mit einem statischen, terrestrischen Laserscanner an verschiedenen Standpunkten. Ein weiterer Vorteil ist die Integration verschiedener Sensoren zur Erfassung der Umgebung. Die 3D-Informationen der Laserscanner kann z. B. durch Kameras um Farbinformation ergänzt werden, wofür vor allem die Weiterentwicklung der Digitaltechnik zur Auswertung der Massendaten ein wichtiger Schritt war (El-Sheimy, 2005).

2.2. Direkte Georeferenzierung

Die Qualität der Georeferenzierung eines Mobile Mapping Systems wirkt direkt auf die Genauigkeit der erzeugten Punktwolken und wird daher im folgenden Abschnitt diskutiert. Der geodätische Raumbezug legt fest, in welchem Koordinatensystem die Daten vorliegen. Damit die Mobile Mapping Daten mit anderen Datenquellen vergleichbar sind oder in bestehende Karten integriert werden können, müssen die Punktwolken in einem globalen Bezugssystem vorliegen. Anschließend wird die Georeferenzierung auf Basis der direkten Georeferenzierung mittels Satelliten in Kombination mit inertialen Navigationssystemen und Odometrie erläutert.

Geodätischer Raumbezug

Nach (Kreitlow u. a., 2010) werden räumliche Bezugssysteme in drei Teile¹ unterschieden: Referenzsystem, Referenznetz und Geodätisches Datum. Das **Referenzsystem** enthält alle geometrischen

¹IERS Conventions 2010: Üblich ist auch die Unterscheidung nach Petit und Luzum, B. (Eds.) (2010) in zwei Teile: Referenzsystem und Referenzrahmen. Das Referenzsystem enthält die theoretischen Definitionen aller geometrischen und physikalischen Parameter, der Referenzrahmen stellt die Realisierung des Systems durch Koordinaten von Punkten auf der Erdoberfläche dar, auf die Anwender Zugriff haben.

und physikalischen Größen zur Beschreibung des geodätischen Erdmodells. Es ist anhand der festgelegten Konventionen und Parameter eindeutig definiert und verändert sich nicht. Im Gegensatz dazu ist das **Referenznetz** (häufig als Referenzrahmen bezeichnet) die Realisierung des Referenzsystems mittels vermarkter Punkte auf der Erdoberfläche, Koordinaten und mathematischen Parametern. Ändert sich die Realisierung, z. B. aufgrund von Erdkrustenbewegungen, muss der Referenzrahmen neu berechnet werden. Zur Unterscheidung wird jede Neuberechnung mit der Jahreszahl der Berechnung versehen. Um eine Beziehung zwischen System und Rahmen herzustellen, definiert das **Geodätische Datum** die Position des Ursprungs, Maßstab und Orientierung der Koordinatenachsen des Referenzrahmens in Bezug auf das Referenzsystem. Die zunehmende Nutzung von Geodaten hat zur Definition des Koordinatenreferenzsystems (CRS = coordinate reference system) geführt, welches nur in Datum und Koordinatensystem unterscheidet, die Unterteilung in System und Rahmen entfällt. Ein CRS ist daher definiert als ein mit der Erde verbundenes, zeitlich invariantes, Bezugssystem. Ändert sich der Bezugsrahmen, wird ein neues CRS eingeführt und ebenfalls um das Datum der Realisierung ergänzt (Kreitlow u. a., 2010).

Mit der Einführung der satellitengestützten Positionierungsverfahren wurden weltweit einheitliche Bezugssysteme erforderlich. Diese werden durch wenige Stationen auf der Erde realisiert und weisen Genauigkeiten in der Größenordnung weniger Dezimeter auf, z. B. das *World Geodetic System 1984* (WGS84). Für geodätische Messungen ist dies unzureichend, daher wurden mit anderen Raumverfahren (SLR² und VLBI³) weitere Stationen durch den *IERS*⁴ bestimmt. Die Realisierung des geozentrischen Referenzsystems im *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) weist eine höhere Genauigkeit als das WGS84 auf. Da beide Systeme im Rahmen ihrer jeweiligen Genauigkeiten übereinstimmen, kann das ITRF das WGS84 bei der Nutzung von GPS ersetzen. Neue Messungen an den Stationen erfordern eine Neuberechnung der Koordinaten. Zur Unterscheidung werden die berechneten Koordinatensätze jeweils mit der Jahreszahl der letzten zur Berechnung genutzten Epoche versehen (Bauer, 2011).

Für Europa wurde ein eigenes System geschaffen, da sich die europäische Platte pro Jahr um etwa 25 mm nach Nordosten verschiebt, sodass sich die Koordinaten von Punkten im globalen ITRF jährlich in der Größenordnung einiger Zentimeter ändern. Dies machte die Definition eines zeitlich invarianten europäischen Referenzsystems erforderlich (Görres und Nothnagel, 2012). Dazu wurden auf der eurasischen Platte weitere Punkte mittels VLBI im *European Terrestrial Reference Frame 1989* (ETRF89) bestimmt und als *European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS89) definiert. Die Genauigkeit der dreidimensionalen ETRF89-Koordinaten wird auf 5 cm geschätzt (Bauer, 2011). Die Einführung des ETRS89 in Europa ermöglicht es, die unterschiedlichen nationalen Referenzsysteme durch ein dreidimensionales, europaweit homogenes Bezugssystem abzulösen. Im Jahr 1991 wurde die Einführung des ETRS89 als einheitliches Bezugssystem für die Bundesrepublik Deutschland von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder (AdV) beschlossen. Die Realisierung des Bezugsrahmens erfolgt durch die SAPOS-Stationen der Landesvermessung (Görres und Nothnagel, 2012; AdV, 2017). Die Transformation der Datenbestände in das ETRS89 ist in den meisten Bundesländern an die Umstellung auf das

²Satellite Laser Ranging, <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>

³Very Long Baseline Interferometry, <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>

⁴International Earth Rotation and Reference Systems Service, www.iers.org

AFIS-ALKIS-ATKIS (AAA)-Datenmodell⁵ gekoppelt, um mehrfache Wechsel der Bezugssysteme zu vermeiden (Kreitlow u. a., 2010).

Zusätzlich zur Darstellung in geozentrischen Koordinaten sind für viele Aufgaben ebene Koordinaten erforderlich. Die Projektion der räumlichen Koordinaten auf dem Ellipsoid in eine Ebene benötigt eine lokale Bezugsfläche, um die Koordinaten möglichst verzerrungsfrei abzubilden (z. B. Hake u. a., 2002). Für die Projektion gibt es unterschiedliche lokale Systeme. In Deutschland wurde bis vor einigen Jahren die Gauß-Krüger-Abbildung (GK) genutzt, inzwischen haben fast alle Bundesländer auf die weltweit genutzte UTM-Abbildung umgestellt. Beide Abbildungen basieren auf der Abwicklung eines transversal orientierten Zylinders um das Erdellipsoid. Für GK wird ein berührender Zylinder an das Ellipsoid genutzt, sodass der Mittelmeridian längentreu abgebildet wird. Der Zylinder der UTM-Abbildung schneidet das Erdellipsoid, daher gibt es zwei längentreue Parameterlinien, der Mittelmeridian wird dagegen verkürzt dargestellt. Zur Berechnung der ebenen Koordinaten aus ellipsoidischen Koordinaten, müssen die Parameter des Bezugsellipsoids bekannt sein. Für Gauß-Krüger-Koordinaten wird das Bessel-Ellipsoid genutzt, welches über das Deutsche Hauptdreiecksnetz (DHDN) realisiert wurde. Die UTM-Abbildung basiert auf dem GRS80-Ellipsoid, realisiert durch das ETRS89. Vor allem für größere Projekte bietet UTM den Vorteil, dass bei 6°-Streifen weniger Streifen zur Abdeckung eines Gebiets erforderlich sind als mit den 3°-Streifen der GK-Abbildung. Niedersachsen lag vor der Umstellung von DHDN/GK auf ETRS89/UTM in drei verschiedenen Streifen, für jeden Streifen waren unterschiedliche, lokal angepasste Transformationsparameter erforderlich. Seit der Umstellung nach ETRS89/UTM liegt das Bundesland komplett in Zone 32 (Nord) und benötigt nur einen Parametersatz zur Transformation, sodass der Aufwand zur Berechnung großer Projekte reduziert wurde. Der Nachteil der UTM-Abbildung liegt in der großen Streckenverzerrung von 40 cm/km am Mittelmeridian, die in Mobile Mapping Projekten berücksichtigt werden muss.

Satellitengestützte Positionierung zur direkten Georeferenzierung

Die direkte Georeferenzierung von Mobile Mapping Systemen erfolgt über globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) wie das amerikanische *NAVSTAR-GPS* kurz GPS⁶ und das russische *GLONASS*⁷. Weitere Entwicklungen gibt es mit dem im Aufbau befindlichen europäischen System *Galileo*, *COMPASS* in China als Erweiterung des regionalen GNSS *BeiDou*, sowie dem indischen *NAVIC* (früher *IRNSS*) mit sieben lokal in Indien verfügbaren Satelliten⁸. Das Grundprinzip ist für die verschiedenen Systeme identisch. Die Bestimmung einer Position erfolgt über die Messung zu mindestens vier Satelliten, aus den Signalen wird im Empfänger die Entfernung zu den Satelliten auf Basis der Zeitverschiebung berechnet. Da die Position der Satelliten in den empfangenen Navigationsnachrichten enthalten sind, kann die Position des Empfängers in einem erdfesten, geozentrischen Koordinatensystem, z. B. WGS84 bei GPS, berechnet werden. Drei der Satelliten werden zur Berechnung der Position benötigt, ein weiterer Satellit dient zur Bestimmung des Empfängeruhr-

⁵Das AAA-Modell soll einen bundesweit einheitlichen Grunddatenbestand für Geobasisdaten ermöglichen. Es besteht aus dem *Amtlichen Festpunktinformationssystem* (AFIS), dem *Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem* (ALKIS) und dem *Amtlichen Topographisch-Kartographisches Informationssystem* (ATKIS).

⁶NAVigation Satellite Timing And Ranging - Global Positioning System

⁷GLOBAL'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema

⁸Indian space agency asks industry to build spare satellites, Artikel vom 9.9.2016, <http://gpsworld.com/with-irnss-1g-launch-india-completes-and-renames-its-navigation-constellation/>

fehlers, da in den Empfängern keine präzisen Uhren eingebaut sind. Eine ausführliche Beschreibung des Messprinzips und der verschiedenen Systeme findet sich in Bauer (2011).

Die gemeinsame Nutzung von GPS und GLONASS verbessert die Integrität und die Verfügbarkeit der Positionslösungen gegenüber einem einzelnen System durch die höhere Anzahl Satelliten und der dadurch erreichten besseren Geometrie zwischen Empfänger und Satelliten. Bei vollem Ausbau beider Systeme stehen mindestens vier Satelliten aus jedem System zur Verfügung. Die größere Anzahl Satelliten ermöglicht die Analyse der Zuverlässigkeit der Navigationslösung, fehlerhafte Messungen können eliminiert werden. Die Positionierung wird aufgrund der hohen Anzahl von Satelliten für kinematische Aufgaben und in ungünstigen Umgebungen, z. B. in engen, dicht bebauten Straßen, zuverlässiger. Eine Steigerung der Genauigkeit der berechneten Position durch die gemeinsame Nutzung beider Systeme konnten Floth und Korth (2007) dagegen nicht nachweisen.

Genauigkeit und Fehlereinflüsse auf die direkte Georeferenzierung

Die Genauigkeit einer GNSS-Position wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Fehlereinflüsse bei der Pseudostreckenmessung sind Satellitenfehler (Ephemeridenfehler und Uhrenfehler), Fehler in der Signalausbreitung (Laufzeitfehler durch Einflüsse von Ionosphäre und Troposphäre, Mehrwegeausbreitung) und Empfängerfehler (Messrauschen und Hardware-Verzögerungen). Aus diesen einzelnen Faktoren resultiert ein Gesamtfehler, der von der geometrischen Konstellation zwischen Satelliten und Empfänger abhängig ist. Für Code-Empfänger liegt die Genauigkeit bei etwa 10 m, moderne GNSS-Empfänger können eine Genauigkeit im Bereich einiger Dezimeter erreichen (Bauer, 2011). Für die Auswertung von Mobile Mapping Daten ist diese Genauigkeit nicht ausreichend, da sie direkten Einfluss auf die Genauigkeit der erzeugten Punktwolken hat. Eine Verbesserung der Genauigkeit kann durch Messungen zu einer zweiten Station und einer relativen Positionsbestimmung, dem sogenannten differentiellen GNSS (DGNSS) erreicht werden, da räumlich korrelierte Messabweichungen durch die simultane Beobachtung reduziert werden. Die Berechnung der Position mittels DGNSS kann in Echtzeit mit RTK (Real Time Kinematic) oder durch eine Offline-Nachbearbeitung mit Korrekturdaten realisiert werden. Für eine Positionierung mittels DGNSS werden simultan Beobachtungen von unterschiedlichen Beobachtungspunkten, z. B. einem Mobile Mapping System und einer Referenzstation, zu mindestens vier identischen Satelliten durchgeführt. Die Koordinaten der Referenzstation müssen zusätzlich mit hoher Genauigkeit bekannt sein, da das Ergebnis der Beobachtungen die dreidimensionale Basislinienvektoren zwischen Mobile Mapping System und Referenz liefert, jedoch keine absolute Position. Die Koordinaten des Mobile Mapping Systems berechnen sich dann aus der Basislinie und den Koordinaten der Referenzstation.

Die Fehlereinflüsse auf die Beobachtungen können mittels DGNSS unterschiedlich gut reduziert werden: Satellitenuhrfehler werden vollständig eliminiert, Satellitenbahnfehler sowie ionosphärische und troposphärische Einflüsse können verringert werden. Der Abstand zur Referenzstation darf aufgrund der atmosphärischen Parameter nur wenige Kilometer betragen. Für einige Anwendungen ist es daher notwendig, eine sog. virtuelle Referenzstation (VRS) zu berechnen, etwa wenn die Referenzstation mehr als 10 km vom Projektgebiet entfernt liegt. Die Daten einer VRS werden aus umliegenden Referenzstationen für die gewünschten Koordinaten interpoliert, sodass die Korrekturdaten direkt für das jeweilige Projektgebiet vorliegen (Bauer, 2011). Eine Referenzstation für Korrekturdaten kann entweder individuell betrieben oder als Dienstleistung genutzt

werden. In Deutschland stellen die Vermessungsverwaltungen der Länder mit dem Dienst SAPOS (AdV, 2017) und private Anbieter (z. B. AXIO-NET GmbH, 2017) Korrekturdaten für Referenzstationen zur Verfügung (Bauer, 2011). Die Nutzung kommerzieller Referenzstationen hat Vorteile gegenüber einer eigenen Referenzstation: Die Koordinaten der flächendeckend verfügbaren Referenzstationen liegen mit hoher Genauigkeit vor und müssen nicht aufwändig bestimmt werden, der Aufbau und Unterhalt einer eigenen Station entfällt. Die Koordinaten der Referenzstationen sind in Deutschland im ETRS89 bestimmt, damit erhält die berechnete Trajektorie ebenfalls ETRS89 Koordinaten. Die Landesvermessung bietet drei unterschiedliche SAPOS-Dienste mit unterschiedlichen Genauigkeiten an (AdV, 2017). Für die Nutzung in Echtzeit stehen die Dienste EPS (Echtzeit Positionierungs-Service) und HEPS (Hochpräziser Echtzeit Positionierungs-Service) zur Verfügung. SAPOS-HEPS wurde eingeführt, um die hoheitlichen Aufgaben der Landesvermessung besser und schneller, und damit wirtschaftlicher, zu lösen. Das Genauigkeitsniveau für HEPS wird mit 1-2 cm für die Lage und 2-3 cm für die Höhe angegeben. Die erreichbare Genauigkeit mit EPS liegt dagegen bei einigen Dezimetern und wird mit 0,3-0,8 m für die Lage und 0,5-1,5 m in der Höhe angegeben. Zusätzlich werden unter dem Namen GPPS (Geodätischer Präziser Positionierungs-Service) Daten mit einer Genauigkeit von 1 cm in der Lage und 1-2 cm in der Höhe für die Nachbearbeitung zur Verfügung gestellt. Statische differentielle Messungen erreichen, abhängig von der Art des Empfängers, Genauigkeiten von wenigen Millimetern bei Auswertung von Code- und Trägerphasenmessungen (Größenordnung besser als 1 ppm), unter der Voraussetzung, dass die Länge der Basislinie kurz ist. Für Basislinien bis zu einer Länge von 10 km kann die Position mit einer Genauigkeit von unter 1 cm bestimmt werden. Bei kinematischen Messungen ist die Genauigkeit mittels DGNS gering und wird für kontinuierliche kinematische Messungen in der Literatur mit 1-2 dm angegeben.

Ergänzung durch inertielle Messverfahren und Odometrie

Mobile Mapping Systeme werden häufig in urbanen Gebieten eingesetzt, in denen Abschattung und Mehrwegeeffekte durch Reflexion der Satellitensignale auftreten. Daher ist eine Positionierung ausschließlich mittels differentiellem GNSS für hohe Genauigkeitsanforderungen nicht ausreichend, sodass die zusätzliche Nutzung von inertialen Navigationssystemen (INS) in Mobile Mapping Systemen heute Standard ist. Die inertielle Navigation bestimmt die Beschleunigungen auf das System in drei Richtungen mittels Kreiselensoren (Gyroskope) für jede Achse. Für den Einsatz in Mobile Mapping Systemen haben sich drei unterschiedliche Arten von Gyroskopen etabliert: Ringlaserkreisel (RLG), Faseroptische Kreisel (FOG) und Mikroelektronisch-Mechanische Systeme (MEMS), die sich durch ihre Genauigkeit und zeitliche Stabilität unterscheiden. Ein ausführlicher Überblick findet sich z. B. in von Hinüber (2002) oder Grewal u. a. (2007).

Der Vorteil einer kombinierten Nutzung von GNSS- und INS-Daten liegt in den komplementären Eigenschaften der Systeme hinsichtlich Datenrate, Umgebungsbedingungen und Genauigkeitshaushalt. GNSS-Messungen erfolgen mit einer Frequenz von 1 - 20 Hz, die Datenraten von INS liegen bei mehreren Hundert Hertz und erzeugen sehr viel dichtere Daten. GNSS-basierte Verfahren benötigen freie Sicht zu Satelliten und die Qualität der Ergebnisse hängt von der Geometrie zwischen Satelliten und Empfänger ab, INS arbeiten unabhängig von der Umgebung. Der Genauigkeitshaushalt von GNSS-Messungen ist zeitunabhängig, der Fehler eines INS wächst hingegen durch die Integration der Messungen mit der Zeit (Wendel, 2007). Die gemeinsame Auswertung von GNSS- und

INS-Daten erfolgt über eine Kopplung der Daten in einem Filter. Abhängig von den zur Verfügung stehenden Daten gibt es zwei verschiedene Strategien zur Positionsbestimmung (Wendel, 2007). In *Loosely-Coupled*-Systemen werden die GNSS-Daten zuerst separat ausgewertet und die berechneten Positionen und Geschwindigkeiten des Fahrzeugs in das Navigationsfilter integriert. Für die Auswertung sind daher Beobachtungen zu mindestens vier GNSS-Satelliten erforderlich, sonst kann keine Stützung der INS-Lösung erfolgen. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass beide Sensoren eine unabhängige Navigationslösung liefern, sodass sich die Systeme aufgrund der Redundanz gegenseitig kontrollieren. Liegen die gemessenen Rohdaten des GNSS-Empfängers vor, können diese in einem *Tightly-Coupled*-System in das Navigationsfilter integriert werden. Dies ermöglicht eine Stützung der INS-Messungen durch die GNSS-Daten, auch an Positionen, an denen weniger als vier Satelliten sichtbar sind und keine Positionsbestimmung auf Basis von GNSS möglich wäre. Allerdings ist der Berechnungsaufwand für *Tightly-Coupled*-Systeme höher als bei *Loosely-Coupled*-Systemen. Eine noch stärkere Integration der Daten mit höherem Berechnungsaufwand finden bei *Ultra-Tightly-Coupled*-Systemen statt. Darin werden GNSS und INS nicht als getrennte Systeme ausgewertet, sondern bereits auf Sensorebene integriert. Im Vergleich zu *Loosely-* und *Tightly-Coupled*-Systemen, wird die Positionsbestimmung dadurch robuster und es werden höhere Genauigkeiten erreicht.

Eine zusätzliche Distanzmessung kann die Positionslösung ebenfalls stützen. Die zurückgelegte Strecke des Fahrzeugs wird zusätzlich über einen Radsensor, z. B. mittels externem DMI (Distance Measurement Instrument), erfasst. Der Sensor wird an einem Rad fixiert und muss fest mit der Fahrzeugkarosserie verbunden sein, die Anzahl der Radumdrehungen wird z. B. mittels optischer Winkelencoder bestimmt. Statt eines externen DMI können die Daten der Raddrehzahlsensoren genutzt werden, die in Fahrzeugen zur Steuerung von Antiblockiersystemen eingebaut sind. Aus dem bekannten Radumfang und den ermittelten Umdrehungen berechnet sich die zurückgelegte Strecke. Die Genauigkeit der DMI-Messungen ist aufgrund von Schlupf begrenzt, daher wird häufig nur die Information genutzt, ob das Fahrzeug steht.

Die Qualität der Positionierung einer Mobile Mapping Messfahrt kann durch Planung der Route unter Berücksichtigung der GNSS-Abdeckung beeinflusst werden. Einen weiteren Einfluss auf die Genauigkeit der Positionierung hat die Fahrdynamik, wie Sukkariéh (2010) und Niu u. a. (2010) zeigen. Für ein Fahrzeug als nicht-holonomes System kann die Genauigkeit der Fahrzeugorientierung (Heading) signifikant verbessert werden, wenn sich das Fahrzeug ausreichend schnell bewegt. Bei zu geringen Geschwindigkeiten oder im Stand ist eine zuverlässige Aktualisierung des Headings aus kombinierten GNSS/INS-Daten nicht möglich. In diesen Fällen muss der Winkel vollständig auf Basis der INS-Messungen aktualisiert werden, sodass die Drift des Systems einen größeren Einfluss gewinnt. Die Drift kann bei Stillstand des Fahrzeugs durch die erwähnte Integration eines Radsensors eliminiert werden, ein negativer Einfluss verbleibt bei geringen Geschwindigkeiten. Geringe Genauigkeiten der Fahrzeugorientierung weisen Niu u. a. (2010) für Geschwindigkeiten unter 30 km/h nach.

2.3. Laserscanner zur Umgebungserfassung

Dieser Abschnitt erläutert das Funktionsprinzip von LiDAR-Sensoren und gibt einen Überblick über verschiedene Laserscanner. Laserscanner messen die Entfernung zu einem Objekt über ausgesendete und wieder empfangene Laserpulse. Jede Messung liefert die Entfernung und Richtung zu einem Objektpunkt relativ zum Scannerkoordinatensystem. Eine 3D-Punktwolke wird erzeugt, wenn ein einzelner Laserstrahl abgelenkt wird oder mehrere Strahlen gleichzeitig in unterschiedliche Richtungen ausgesendet werden und das Gesamtsystem zusätzlich um eine zweite Achse rotiert oder bewegt wird. Neben der geometrischen Erfassung der Umgebung bieten viele Laserscanner die Möglichkeit, die Reflektivität der abgetasteten Oberfläche, und damit zusätzlich radiometrische Eigenschaften der Umgebung, zu erfassen. Die Wahl eines geeigneten Laserscanners wird vom benötigten Entfernungsbereich, der geforderten Dichte der erzeugten Punktwolke sowie den Genauigkeitsanforderungen der Anwendung bestimmt. Zur Entfernungsmessung werden in Laserscannern Impulslaufzeitverfahren (Time-of-flight measurement, ToF), Phasendifferenzverfahren (phase measurement) oder Triangulationsverfahren genutzt. Scanner für mobile Verfahren haben typischerweise eine Reichweite im Bereich bis wenige hundert Meter (Anhang Tabelle A.1) und nutzen sowohl Impulslaufzeitverfahren als auch Phasendifferenzverfahren. Triangulationsscanner haben nur einen Messbereich bis etwa 5 m und sind daher für kinematische Anwendungen nicht geeignet. Sie werden vor allem im industriellen Bereich bei sehr hohen Genauigkeitsanforderungen eingesetzt und daher nicht weiter betrachtet. Eine detaillierte Übersicht bietet z. B. in Vosselmann und Maas (2010), Kapitel 1.

Das **Impulslaufzeitverfahren** berechnet die Entfernung ρ zu Objekten aus der Laufzeit wiederholter kurzer Pulse:

$$\rho = \frac{c}{n} \cdot \frac{\tau}{2}, \quad (2.1)$$

mit Lichtgeschwindigkeit c , Refraktionsindex n (abhängig von Temperatur, Druck und Luftfeuchte) sowie Laufzeit τ für den Hin- und Rückweg. Ein Puls kann, abhängig vom jeweiligen Scanner, als mehrfaches Echo vom Empfänger detektiert werden, wenn das Objekt teilweise durchlässig ist, z. B. bei Vegetation. Die Genauigkeit der Distanzmessung ist beim Impulslaufzeitverfahren abhängig von der Flankenanstiegszeit t_r des Laserpulses und dem Signal-Rausch-Verhältnis SNR :

$$\delta_{r-p} \approx \frac{c}{2} \cdot \frac{t_r}{\sqrt{SNR}}. \quad (2.2)$$

Kommerzielle Laserscanner für terrestrische Anwendungen mit Impulslaufzeitverfahren haben eine Reichweite von bis zu 6000 m und je nach Scanner eine Unsicherheit in der Distanzmessung von 5-15 mm, in Ausnahmefällen bis etwa 50 mm (Vosselmann und Maas, 2010, Kapitel 1).

Zu den **Phasendifferenzverfahren** zählen die vier verschiedenen Messverfahren Amplitudenmodulation unter Nutzung von Phasendifferenzen, Frequenzmodulation unter Ausnutzung der Schwebungsfrequenz, phasencodierte Kompression sowie chaotische Laser, deren Wellenform durch einen Halbleiterlaser erzeugt wird. Phasendifferenzverfahren, die mit Amplitudenmodulation arbeiten, haben typischerweise einen Entfernungsbereich von bis zu 100 m bei sehr hoher Datenrate, kommerzielle Systeme erreichen Datenraten zwischen 10 kHz und >1000 kHz. Die Entfernungsmessung erfolgt mittels kontinuierlicher Wellenmodulation, wobei das ausgehende Signal und das empfangene

Signal verglichen werden. Die Phasendifferenz zwischen zwei Wellenformen liefert einen zeitlichen Versatz

$$\tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda_m}{c}, \quad (2.3)$$

mit der Phasendifferenz $\Delta\varphi$, der Wellenlänge der Amplitudenmodulation λ_m und der Lichtgeschwindigkeit in Vakuum c , aus der sich eine Strecke nach Gl. (2.1) berechnet. Das Phasendifferenzverfahren kann keine absolute Distanzen bestimmen, da Vielfache der Wellenlänge durch das Verfahren nicht ermittelt werden. Die Lösung dieser Mehrdeutigkeiten kann z. B. durch Mehrfrequenz-Wellenformen gelöst werden.

Die Unsicherheit der Distanzmessung ist abhängig von der Wellenlänge der Amplitudenmodulation und dem Signal-Rausch-Verhältnis und lässt sich mit

$$\delta_{r-AM} \approx \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\lambda_m}{\sqrt{SNR}} \quad (2.4)$$

abschätzen. Die erreichbaren Genauigkeiten in der Distanzmessung liegen bei etwa 1-5 mm und damit etwas geringer als beim Impulslaufzeitverfahren. Mit einem Entfernungsbereich bis etwa 100 m (teilweise bis 400 m) und Datenraten bis etwa 1.000.000 Punkte/s werden die Scanner im terrestrischen Bereich für statische oder kinematische Anwendungen eingesetzt. Die zweite Gruppe der Phasendifferenzverfahren bilden Scanner auf Basis von Frequenzmodulation. Diese haben typischerweise einen geringeren Entfernungsbereich und erreichen sehr hohe Genauigkeiten. Kommerzielle Systeme haben z. B. bei einer Datenrate von 40 Punkten/s eine Distanzunsicherheit von 30 μm und bei 250 Punkten/s eine Unsicherheit von 300 μm . Aufgrund der geringen Punktzahl können diese Scanner in kinematischen Anwendungen nicht genutzt werden (Vosselmann und Maas, 2010, Kapitel 1).

Laserscanner für den kinematischen Einsatz

Scanner für den kinematischen Einsatz können als 2D- oder 3D-Systeme aufgebaut sein, um die Umgebung zu erfassen. Linien- oder Profils Scanner haben einen Laserstrahl mit dem sie eine zweidimensionale Punktwolke in einer Ebene über einen rotierenden (polygonalen) Spiegel erzeugen. Die dritte Dimension wird durch die Rotation des gesamten Scanners um eine zweite Achse (statische Verfahren) oder durch die Bewegung der Plattform, auf der der Scanner montiert ist, erreicht. Beispiele sind die Scanner VQ-450 und VUX-1HA der Firma *RIEGL* Laser Measurement Systems GmbH (Riegl LMS GmbH, 2010) oder die 2D-Scanner der Firma *SICK* AG (SICK AG, 2014). Als 3D-Scanner ist der Z+F Profiler (Zoller + Fröhlich GmbH, 2013) sowie der FARO Focus 3D X330 (FARO Europe Europe GmbH & Co. KG, 2013) ausgelegt, die bei statischer Nutzung eine 3D-Punktwolke durch die Drehung des Scanners erfassen. In kinematischen Anwendungen wird die Drehung der Scanner durch die Bewegung der gesamten Plattform ersetzt, die Scanner erfassen die Umgebung in Linien. Die Punktrate bei diesen Scannern liegt zwischen 550.000 und 1 Million Punkte pro Sekunde, bei einer Reichweite zwischen 100 m und 330 m, abhängig vom Verfahren zur Entfernungsmessung (ausgewählte Spezifikationen in Tabelle A.1, oben).

Die 3D-Scanner der Firma Velodyne Acoustics, Inc. (Velodyne Acoustics, Inc., 2017) arbeiten mit 32 (64) Laserstrahlen, die von fest eingebauten Emitttern simultan ausgesendet und von 32 (64) Detektoren erfasst werden. Die Scanner haben ein begrenztes vertikales Sichtfeld von etwa 40°

($26,8^\circ$), wobei der größere Teil der Strahlen nach unten ausgerichtet ist. Pro Sekunde erzeugt der HDL-32E bis zu 700.000 Punkte mit einer Reichweite von bis zu 100 m, der HDL-64E S2 mit bis zu 1,3 Mio. Punkte pro Sekunde fast doppelt so viele. Für eine 360° -Erfassung der Umgebung rotieren die Scanner mit 5-20 Hz (HDL-32E) oder 5-15 Hz (HDL-64E S2) um ihre Stehachse und erzeugen ohne zusätzliche Bewegung durch ein Fahrzeug eine 3D-Punktwolke. Eine Übersicht der Spezifikationen findet sich in Tabelle A.1 (3D-Scanner).

Im Automobilbereich spielt zusätzlich die Größe und das Gewicht der Sensoren eine Rolle, kompakte Beispiele für Scanner stellen der LD-MRS 4-Layer der Firma SICK AG (SICK AG, 2009) oder 3D-Scanner Velodyne VLP-16 Puck (Velodyne Acoustics, Inc., 2017) dar. Für einen Serieneinsatz im Automobilbereich sind *Solid State* oder *Flash* LiDAR Systeme in der Entwicklung, da diese keine beweglichen Verschleißteile haben. Zu diesen zählen Scanner mit fester Strahlanordnung ohne rotierenden Spiegel, wie der S3 Solid State LiDAR der Firma Quanergy⁹ oder der auf der CES 2017 vorgestellte Hi-Res 3D Flash LIDAR der Continental AG¹⁰ (Tabelle A.1, Solid State).

2.4. Geometrie kinematischer LiDAR-Systeme

Kinematische LiDAR-Systeme erfordern, anders als statisch eingesetzte Laserscanner mit einem lokalen Koordinatensystem, die Definition unterschiedlicher Koordinatensysteme. Durch die Bewegung des Systems während der Aufnahme einer Punktwolke können die Punkte nicht im Scanner-Koordinatensystem dargestellt werden, sondern benötigen für die gemeinsame Darstellung aller Punkte ein globales Koordinatensystem. Der folgenden Abschnitt erläutert die geometrischen Grundlagen der mobilen Laserscanner-Systeme für flugzeugbasierte Systeme, als Vorreiter dieser Technik, sowie für kinematische terrestrische Systeme, mit den Grundlagen für die vorliegende Arbeit. Details für flugzeugbasierte Systeme finden sich in der Literatur z. B. bei Kilian u. a. (1996), Kraus (2004) oder Vosselmann und Maas (2010), Kapitel 1 und Kapitel 3. Eine Übersicht für terrestrische Systeme bietet z. B. Ellum und El-Sheimy (2002).

Die Georeferenzierung der LiDAR-Messungen basiert auf der Positionsbestimmung mittels GNSS- und INS-Sensoren und der exakten zeitlichen Synchronisierung der Laserpulse. Die LiDAR-Messungen liegen in einem definierten Scanner-Koordinatensystem mit Zeitstempel, Richtung und Distanz zu jedem erfassten Objektpunkt vor. Anhand des Zeitstempels kann jeder Messwert einer Position zugeordnet werden. Das Plattformsystem (sog. Body-System) wird durch die drei Achsen des INS definiert, realisiert durch die drei genutzten Beschleunigungssensoren. Das Body-System beschreibt die Bewegung des Fahrzeugs und ist daher zeitabhängig. Die Position des Systems liefert die exzentrisch angebrachte GNSS-Antenne. Die relative Orientierung zwischen Scanner und Body-System muss in einer Kalibrierung ermittelt werden. Damit ist eine Transformation der LiDAR-Messungen in das Body-System möglich. Anschließend muss die Transformation der Punkte aus dem Body-System in ein globales Koordinatensystem erfolgen. Die Referenz zur gemeinsamen Darstellung der Orientierung wird üblicherweise als topozentrisches NED-System (North-East-Down) an das Ellipsoid definiert. Die Transformation der Punkte aus dem NED-System in ein

⁹Angekündigt auf <http://quanergy.com/s3/>

¹⁰Continental entwickelt das Umfeldmodell der nächsten Generation, Pressemitteilung vom 4.1.2017, http://www.continental-corporation.com/www/presseportal.com_de/themen/pressemitteilungen

globales ECEF-System (Earth-Centered Earth-Fixed, realisiert durch eine Variante des ITRF) erfolgt abhängig vom gewählten Ellipsoid und von den geographischen Koordinaten. Die Projektion in ein Landeskoordinatensystem erfolgt mit Hilfe eines Kartensystems mit Ost-, Nord- und Höhen-Bezug. Zur Darstellung der Punktwolke in einem Landeskoordinatensystem (auch Kartensystem) müssen die Messdaten des Scanners in mehreren Schritten transformiert werden (nach Vosselmann und Maas (2010), Kapitel 3):

$$\text{Scanner} \rightarrow \text{Body} \rightarrow \text{NED} \rightarrow \text{ECEF} \rightarrow \text{Geoid} \rightarrow \text{Karte}$$

Die Darstellung in einer Karte erfordert zusätzliche Korrekturen für das Geoid und die Projektion in das gewünschte Landeskoordinatensystem mit Rechts- und Hochwert.

Ein Objektpunkt P im Scanner-Koordinatensystem x_P^{scan} kann mittels

$$x_P^{ecef} = x(t)_{body}^{ecef} + R_{ned}^{ecef}(\Phi, \Lambda, t) \cdot R_{body}^{ned}(r, p, y, t) \cdot R_{scan}^{body}(\omega, \varphi, \kappa) \cdot (x_{body}^{scan} + x_P^{scan}) \quad (2.5)$$

in das globale ECEF-Koordinatensystem transformiert werden, wobei sich der Punkt P im kartesischen Scanner-Koordinatensystem aus den gemessenen Polarkoordinaten jedes Punktes mit der Distanz ρ und dem Winkel θ berechnet. Die mit t versehenen Elemente in Gl. (2.5) variieren mit der Zeit. Zu den zeitabhängigen Parametern gehören die drei Winkel Roll, Pitch und Yaw (r, p, y), die die Orientierung des INS relativ zu einem globalen System angeben, während die Winkel ω, φ, κ die relative Orientierung zwischen INS (Body-System) und Scanner-Koordinatensystem angeben und bei fixierter Orientierung während der Erfassung unverändert bleiben. Die Angabe der Trajektorie aus der GNSS/INS-Messung erfolgt über ellipsoidische Koordinaten mit Angabe der Länge und Breite (Φ, Λ), die sich mit der Bewegung des Systems ebenfalls verändern. x_P^{ecef} beschreibt einen Punkt P in ECEF-Koordinaten, x_P^{scan} gibt die kartesischen Koordinaten des Punktes P im Scanner-Koordinatensystem an. $x(t)_{body}^{ecef}$ definiert den Vektor zwischen dem Ursprung des INS-Systems (Body) und dem ECEF-System, die R_a^b geben die Rotation von System a in ein System b an.

Fehlereinflüsse

Bei der kinematischen Erfassung von Punktwolken treten unterschiedliche Fehlereinflüsse auf, die auf die generierten Punkte wirken. Eine ausführliche Übersicht über Fehlereinflüsse auf mobil erfasste Punktwolken bieten Vosselmann und Maas (2010), Kapitel 1 und 3 für flugzeugbasierte Systeme und Ellum und El-Sheimy (2002) für terrestrische Systeme. Die Auswirkungen der einzelnen Fehler auf die Punktwolke sind für flugzeugbasierte und terrestrische LiDAR-Systeme unterschiedlich groß. Ein Winkelfehler wirkt sich bei der Erfassung von einem Flugzeug aufgrund der großen Distanz von rund 1000 m zum Ziel stärker auf die Koordinaten der Punkte aus als bei einem terrestrischen System mit Distanzen von weniger als 50 m bis etwa 100 m. Der Einfluss von GNSS-Messungen ist dagegen bei flugzeugbasierten Systemen geringer, da keine Signal-Abschattung durch Gebäude oder Vegetation auftritt. Lokale Effekte auf die Positionierung treten bei flugzeugbasierten Systemen mehrheitlich in engen Kurven durch *Cycle Slips* oder durch Mehrwegeeffekte der Signale an den Tragflächen des Flugzeuges auf. Aufgrund der freien Sicht zu den Satelliten sind diese Einflüsse jedoch geringer als bei terrestrischen Systemen in städtischen Gebie-

ten. Bei der Fehlerabschätzung müssen nicht nur die Fehler der einzelnen Beobachtungen bestimmt werden, sondern auch Einflüsse, die sich aus der Kombination der Sensoren ergeben (Vosselmann und Maas, 2010, Kapitel 3). Auf Gl. (2.5) wirken Distanz- und Winkelfehler des Scanner sowie Positions- und Orientierungsfehler der GNSS/INS-Einheit als Fehler, die aus den Messungen der einzelnen Sensoren resultieren. Zusätzlich ergeben sich Orientierungs- (*Boresight Alignment*) und Translationsfehler (Hebelarm, *lever-arm*) zwischen Scanner und INS und als Fehlereinflüsse Kalibrierfehler zwischen Antenne und INS aus dem Zusammenspiel der Sensoren.

2.5. Mobile Mapping Systeme

Mobile Mapping Systeme integrieren verschiedene Sensoren zur Umgebungserfassung und zur Georeferenzierung in einem Gesamtsystem. Die Qualität der erzeugten Punktwolken ist nicht nur von der Georeferenzierung sondern auch von den Sensoren zur Objekterfassung abhängig. Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über verschiedene Komplettsysteme und stellt das Mobile Mapping System *RIEGL VMX-250* vor, dessen Daten in dieser Arbeit genutzt werden.

Aktuell gibt es eine große Auswahl kommerzieller Mobile Mapping Systeme sowie Lösungen von Forschungseinrichtungen. Übersichten bieten z. B. Ellum und El-Sheimy (2002), Barber u. a. (2008) und Petrie (2010). In der Anfangszeit der mobilen Datenerfassung wurden Mobile Mapping Systeme meist vom Anwender entwickelt und gebaut. Ein Beispiel dafür ist das System MoSES der Firma 3D Mapping Solutions GmbH¹¹, die heute sowohl Dienstleistungen im Bereich der kinematischen Erfassung als auch modulare Messtechnik anbietet. Eine Aufteilung in Systemhersteller und Serviceanbieter im Bereich Mobile Mapping nimmt Petrie (2010) vor. Die meisten Systeme wurden für die Nutzung auf einem PKW entwickelt, einige Systeme können auch auf Schienen- oder Wasserfahrzeugen eingesetzt werden. Aktuell geht die Entwicklung hin zu modularen und kompakten, leichten Systemen, um sie flexibel auf unterschiedlichen Plattformen einzusetzen. Sie können z. B. von einer Person getragen oder auf einem Wagen geschoben werden und sind für unterschiedliche Transportmittel geeignet (z. B. ROBIN - Multi-Plattform Mobile Mapping¹²). Eine Auswahl von Mobile Mapping Systemen mit Laserscannern und (optionalen) Kameras von kommerziellen Anbietern enthält Tabelle A.3.

Das Mobile Mapping System RIEGL VMX-250

Für diese Arbeit wurde das Mobile Mapping System *RIEGL VMX-250* (Rieger u. a., 2010; Riegl LMS GmbH, 2012a) genutzt. Das System besteht aus einem Messkopf mit GNSS/INS und zwei Laserscannern VQ-250 (Abb. 2.1, *a*). Die Sensoren sind fest montiert und werksseitig kalibriert. Die direkte Georeferenzierung wird durch einen Radsensor (DMI) ergänzt, um eine mögliche Drift der Position auszugleichen (Abb. 2.1, *b*). Es können zusätzlich bis zu sechs Kameras für Farbinformation in das System integriert werden.

Die eingesetzten Laserscanner arbeiten als Profils Scanner mit rotierendem Spiegel und einem Sichtfeld von 360°, die Entfernungsmessung basiert auf der Laufzeitmessung der Laserpulse. Das op-

¹¹www.3d-mapping.de

¹²www.3dlasermapping.com/robin/



Abbildung 2.1.: Das Mobile Mapping System RIEGL VMX-250: Messkopf mit zwei Laserscannern sowie vier (optionalen) Kameras zur Umgebungserfassung und GNSS/INS-Einheit zur Positionierung. Radsensor zur Verbesserung der Positionierung. Steuereinheit mit PC zur Datenerfassung und Speicherung.

tische Echosignal wird vom Empfänger digitalisiert, anschließend erfolgt online die Analyse der Wellenform, in der die exakte zeitliche Position für jedes Objekt berechnet wird. Dadurch ist es möglich, mehrere Ziele pro Puls zu erfassen und Objekte hinter durchlässigen Hindernissen, z. B. Gebüsch, Baumkronen oder Zäunen, aufzunehmen. Die Dichte der Punktwolke wird quer zur Fahrtrichtung über die wählbare Pulsrate und in Fahrtrichtung über die Anzahl der Rotationen des Spiegels pro Sekunde beeinflusst. Alle aufeinanderfolgenden Messungen einer vollständigen Umdrehung werden als Scanlinie bezeichnet. Bei einer maximalen Rate von 100 Scanlinien pro Sekunde und einer maximalen Pulsrate von 300 kHz ergibt sich ein Punktmuster auf dem Boden von 2 mm pro Meter Entfernung quer zur Fahrtrichtung und 1 cm pro m/s Fahrtgeschwindigkeit in Fahrtrichtung. Bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 10 m/s ergibt sich auf einer Fassade in 50 m Entfernung zum Fahrzeug ein gleichmäßiges Raster von 10 cm x 10 cm. Die Spezifikationen der Laserscanner sind in Tabelle A.2 zusammengefasst.

Daten des RIEGL VMX-250

Die Prozessierung der Rohdaten des RIEGL VMX-250 erfolgt in kommerziellen Softwarepaketen. Für die Auswertung der Lokalisierung steht die Software *POSPac MMS* der Firma Applanix (Applanix Corp., 2012) zur Verfügung, für die Daten der Laserscanner die Software *RiPROCESS* (Riegl LMS GmbH, 2011). Korrekturdaten für die GNSS-Beobachtungen, z. B. von SAPOS-Stationen der Landesvermessung (AdV, 2017), können in der Auswertung der Trajektorie integriert werden. Das Ergebnis ist eine gefilterte Trajektorie sowie die zugehörigen Standardabweichungen in einem proprietären Dateiformat zur Weiterverarbeitung in RiPROCESS. Ein Export der Trajektorie und der geschätzten Genauigkeiten im Textformat ist ebenfalls möglich. Die Rohdaten der Scanner liegen ebenfalls in einem proprietären Format vor und müssen vor der Bearbeitung in ein lesbares Format umgewandelt oder in georeferenzierte 3D-Punktwolken konvertiert werden. Die Eigenschaften der erfassten Daten werden im Folgenden kurz beschrieben.

Die Positionierungsdaten enthalten Position und Orientierung des Fahrzeugs für jeden Zeitpunkt der Erfassung aus GNSS- und INS-Messungen. Während der Fahrt erfolgt eine interne Integration dieser Daten. Im Rahmen eines *Error-State-Space*-Kalmanfilters werden die Fehler des geschätzten Systemzustands mittels Tightly-Coupling bestimmt (Kapitel 2.2), detaillierte Informationen zur

Online-Filterung stehen nicht zur Verfügung. Die Nachverarbeitung der Positionierungsdaten liefert eine korrigierte Trajektorie mit Angabe der RMS-Fehler aller berechneten Parameter. Zusätzlich können die gefilterten Echtzeit-Daten des GNSS-Empfängers mit 1 Hz, des INS mit 200 Hz sowie des DMI ausgelesen werden. Gemessene Drehraten oder Beschleunigungen stehen in Form von Pulsen zur Verfügung, die erforderlichen Faktoren zur Umrechnung sind nicht bekannt. Eine Auswertung der Trajektorie auf Basis eines Tightly-Coupled-Filters in Kombination mit den Informationen der Punktwolken ist daher nicht möglich.

Die Rohdaten der Laserscanner enthalten für jeden erfassten Zielpunkt Zeitstempel, Distanz und Richtung, Intensität sowie weitere Informationen der Messung. Die Daten werden bei der Aufzeichnung in separate Dateien für jeden Scanner, in dieser Arbeit mit Scanstreifen bezeichnet, gespeichert. Es wird empfohlen, die Aufzeichnung bei Stillstand des Fahrzeugs anzuhalten, um sehr dichte Daten an einer Position ohne zusätzliche Information zu vermeiden. Eine Unterbrechung der Daten an Kreuzungen während der Fahrt ist für die Auswertung sinnvoll, um Scanstreifen in einzelne Straßen zu teilen und die Dateigröße der einzelnen Scanstreifen zu begrenzen. Jeder Scanstreifen erhält einen eindeutigen Zeitstempel für den Zeitpunkt der Dateierzeugung, zusammen mit dem Index des jeweiligen Scanners (1 oder 2) ergibt sich daraus für jeden Scanstreifen eine eindeutige *RunID*, welche als Attribut für jeden Punkt in den Kacheln gespeichert werden kann, um Punkte in der Auswertung zu identifizieren. Die Rohdaten der Scanner werden zur weiteren Verarbeitung in der Software RiPROCESS in ein lesbares Format konvertiert und liegen dann mit dem Zeitstempel der Aufnahme im Scanner-Koordinatensystem vor. Diese Daten können entweder in RiPROCESS weiterverarbeitet oder ausgelesen und mit eigener Software prozessiert werden. Anhand des Zeitstempels werden aus der bekannten relativen Orientierung zwischen Scanner und GNSS/INS-Einheit und der Pose des Fahrzeugs dreidimensionale Koordinaten für die erfassten Objektpunkte erzeugt.

2.6. Umgebungsdaten als Scanstreifen und Punktwolken

Scanstreifen mit 3D-Information

Die Rohdaten der Scanner werden als Streifen entlang der Trajektorie erfasst. Aus der Aufnahmetechnik eines rotierenden Spiegels und der Bewegung des Fahrzeugs enthalten die Rohdaten Informationen über die Nachbarschaft der Punkte. Benachbarte Punkte auf einer Scanlinie sind meist auch in der Realität benachbart, ebenso wie aufeinanderfolgende Scanlinien. Diese Nachbarschaftsinformation der Punkte kann in der Darstellung als *Scanstreifen* erhalten werden, worin die erfassten Punkte der Scanlinien in den Spalten eines 2D-Arrays gespeichert werden (Abb. 2.2).

Punkte aufeinanderfolgender Scanlinien werden im Scanstreifen in benachbarten Spalten gespeichert, jedes Winkelinkrement entlang einer Scanlinie hat einen festen Zeilenindex. Benachbarte Zellen im Streifen haben für das Mobile Mapping System *RIEGL VMX-250* eine zeitliche Differenz von 10 ms horizontal und 3 μ s für vertikale Nachbarn. Jede Zelle im Scanstreifen enthält die 3D-Information des Punkts sowie weitere Parameter, wie Intensität und Zeitstempel. Der größte Vorteil dieser Repräsentation ist die vollständig erhaltene Nachbarschaftsinformation aus den Rohdaten der Scanner, die bei Verwendung kartesischer 3D-Koordinaten verloren geht. Ein weiterer

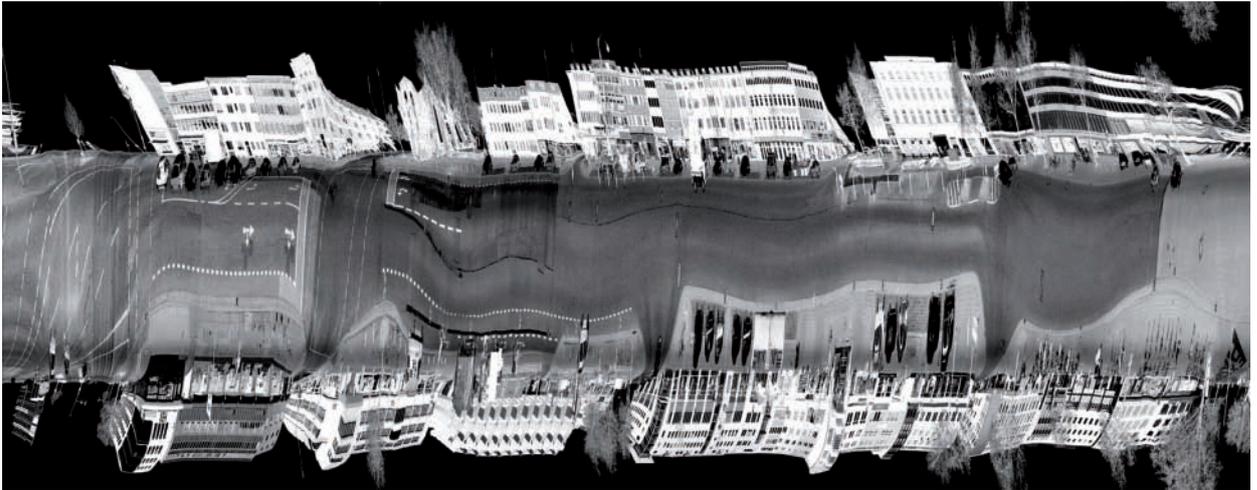


Abbildung 2.2.: Darstellung einer 3D-Punktwolke als Scanstreifen, die Intensität der Punkte liefert die Grauwerte.

Vorteil ist die Möglichkeit zur Darstellung und Bearbeitung der rechtwinkligen Scanstreifen als Bilder, sodass Algorithmen der Bildverarbeitung angewendet werden können.

Punktwolken

Eine Verarbeitung der Rohdaten des Mobile Mapping Systems *RIEGL VMX-250* mit der Software *RiPROCESS* liefert unstrukturierte 3D-Punktwolken, die alle erfassten 3D-Punkte enthalten und zur weiteren Bearbeitung in verschiedenen Formaten exportiert werden können. Jeder Punkt ist in der Punktwolke durch seine 3D-Koordinaten und gegebenenfalls weiteren Eigenschaften wie Zeitstempel und Intensität definiert, besitzt jedoch keine Informationen über benachbarte Punkte oder Objekte. Abb. 2.3 zeigt links den Ausschnitt einer Punktwolke in 2D-Ansicht, rechts im Bild ist ein Teil der Szene in 3D-Ansicht dargestellt, der Baum im linken Bild oben in der Mitte befindet sich hier im Vordergrund.



Abbildung 2.3.: Punktwolke einer Straße mit Fassaden, geparkten Fahrzeugen parallel zur Fahrbahn und einem Baum, eingefärbt nach der Höhe der Punkte über Grund. Aufsicht als 2D-Darstellung (links) und mit Blickrichtung nach Süden in 3D-Darstellung (rechts).

Partitionieren der Punkte in Kacheln

Mobile Mapping Messfahrten erzeugen sehr große Datenmengen, das *RIEGL* VMX-250-System liefert mit einer Datenrate von 600.000 Punkten/s über 1 Milliarde Punkte in 30 Minuten. Eine geeignete Partitionierung der Daten ist daher für die Weiterverarbeitung und Speicherung sinnvoll. Eine Möglichkeit stellt die Aufteilung der Daten in zweidimensionale Kacheln, mit Angabe der Höhe jedes Punkts als Attribut, dar. Die Daten jeder Kachel können nach der Partitionierung separat und parallel ausgewertet werden. Aufgrund der Datencharakteristik, z. B. der begrenzten Höhe über einer Straßenebene oder anthropogenen Objekten mit senkrechten Fassaden, ist die Wahl einer Projektion sinnvoll, die für eine Aufteilung der Kacheln entlang der XY-Ebene vertikale Fassaden liefert. Daher bietet sich für die Verarbeitung die Projektion der Punkte nach UTM an (Kapitel 2.2). Jede Kachel bekommt einen eindeutigen Index, der sich aus dem Ursprung der Kachel, z. B. der linken unteren Ecke der Kachel, im globalen Bezugssystem berechnet. Um die Größe der Indizes zu beschränken, kann ein geeigneter lokaler Offset für jedes Mobile Mapping Projektgebiet gewählt werden. Die Punkte werden anhand ihrer Lage-Koordinaten in die Kacheln einsortiert, die Höhe der Punkte wird als Attribut abgelegt. Innerhalb der Kacheln werden die Koordinaten relativ zum Ursprung der Kachel gespeichert. Die Größe der Kacheln ist wählbar, innerhalb eines Datensatzes jedoch für alle Kacheln identisch. Die Rücktransformation der Punkte aus den Kacheln in globale Koordinaten erfolgt über

$$\begin{aligned} X_{UTM} &= x_{tile} + X_{Offset} + x_{index} \cdot tilesize \\ Y_{UTM} &= y_{tile} + Y_{Offset} + y_{index} \cdot tilesize, \end{aligned} \quad (2.6)$$

wobei x_{tile}, y_{tile} die Koordinaten des Punktes in der Kachel bezüglich des Kachel-Koordinatensystems angibt. Die globalen Koordinaten des Ursprungs jeder Kachel ergeben sich aus dem lokal wählbaren Offset im globalen Bezugssystem der definierten Projektion X_{Offset}, Y_{Offset} in Metern, dem Index x_{index}, y_{index} der Kachel sowie der Seitenlänge $tilesize$ in Metern, die für x und y identisch ist. Zusätzlich zu den 2D-Koordinaten können die Kacheln weitere Attribute wie Höhe, Farbwert (RGB), Intensität oder Zeitstempel, enthalten. Eine zusätzliche Datei der Metadaten eines Projekts enthält die Informationen welche Attribute für jeden Punkt gespeichert wurden, den lokal wählbaren Offset X_{Offset}, Y_{Offset} , die Kachelgröße $tilesize$, das Koordinatensystem der Projektion (z. B. UTM) sowie eine Liste aller erzeugten Kacheln mit dem eindeutigen Index x_{index}, y_{index} und der enthaltenen Punktzahl.

Zeitliche Segmentierung von Punktwolken innerhalb der Kacheln

Die Partitionierung der Kacheln erfolgt ohne Berücksichtigung des Zeitstempels, alle Punkte an einer Position aus unterschiedlichen Epochen werden in derselben Kachel gespeichert. Zur Weiterverarbeitung der Punktwolken ist es für viele Anwendungen sinnvoll, die Punktwolken innerhalb der Kacheln zeitlich zu trennen. Für die zeitliche Segmentierung gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Trennung der Epochen anhand von Lücken in den Zeitstempeln: Dieses Verfahren nutzt aus, dass die Zeitstempel von Objekten, die innerhalb einer Epoche erfasst wurden, sehr nah beieinander liegen. Wurden Objekte zu einer späteren Epoche nochmals erfasst, entsteht eine große Lücke zwischen den Zeitstempeln. Die Länge dieser Unterbrechung muss abhängig von den Daten für jede Kachel separat gewählt werden und daher automatisiert detektierbar

sein. Bei Mobile Mapping Systemen kann man davon ausgehen, dass die Lücke zwischen zwei Epochen mehrere Minuten beträgt, sodass eine automatische Trennung möglich ist.

2. Trennung der Epochen anhand der Dateistruktur: Dieses Verfahren basiert auf der Dateistruktur der erfassten Daten. Bei Unterbrechung der Datenaufzeichnung an Kreuzungen oder bei Stopps wird eine neue Datei pro Scanner generiert. Alle Punkte die bei der Erfassung ohne Unterbrechung der Aufzeichnung in einem Datensatz abgelegt wurden erhalten eine identische RunID (Abb. 2.4). Anhand dieses Werts kann eine zeitliche Trennung der Punktwolken erfolgen, wenn identische Objekte innerhalb einer Datei nicht mehrfach erfasst wurden, etwa durch Wenden des Messfahrzeugs ohne Unterbrechung der Aufzeichnung.

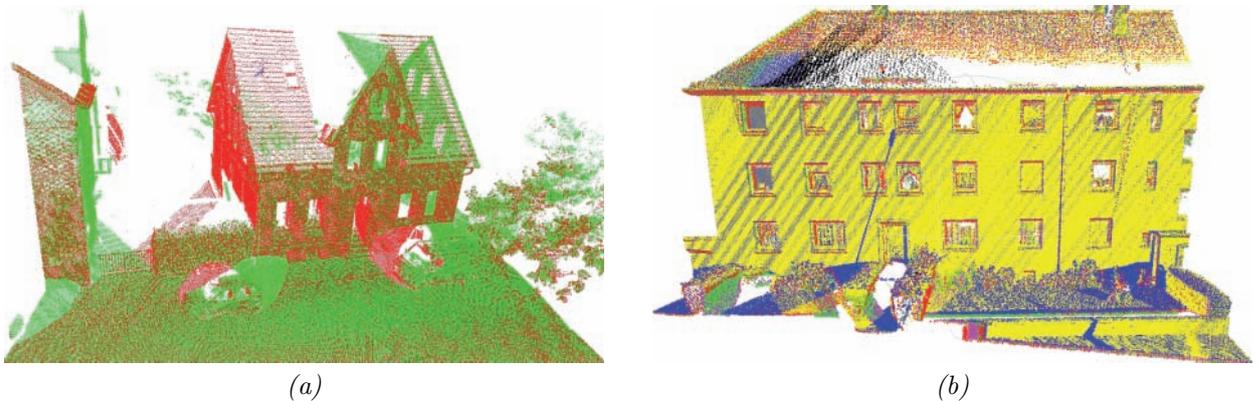


Abbildung 2.4.: Punktwolken unterschiedlicher Epochen am Beispiel von zwei Kacheln. Jede Epoche wird durch eine eigene Farbe dargestellt.

2.7. Ausgleichung georeferenzierter Punktwolken

Verfahren zur Ausgleichung von Punktwolken werden notwendig, wenn für ein Gebiet mehrere überlappende Punktwolken aus unterschiedlichen Epochen vorliegen und die Genauigkeit der Georeferenzierung nicht ausreichend ist. In diesem Fall ist die Qualität der Georeferenzierung, von wenigen Zentimetern bis Dezimetern oder Metern, direkt in den Punktwolken sichtbar. Für eine gemeinsame Karte oder Auswertung der Daten, müssen die Punktwolken daher in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden. Für Mobile Mapping Systeme muss berücksichtigt werden, dass diese aufgrund von wechselnden GNSS-Einflüssen, wie Mehrwegeeffekte, keine starre Transformation über das gesamte Projektgebiet erlauben. Eine Möglichkeit bietet der Standard-Algorithmus zur iterativen Suche der nächstgelegenen korrespondierenden Punkte (Iterative-Closest-Point(ICP)-Algorithmus) sowie ein adaptierter ICP-Algorithmus zur Suche von Punkt-zu-Ebene-Korrespondenzen, angewendet in Kacheln. Zusätzlich werden die Verfahren zur Aerotriangulation von Luftbildern und der Streifenausgleichung (engl.: strip adjustment) im flugzeugbasierten Laserscanning vorgestellt, in denen der Einsatz von Passpunkten zur Verbesserung der Daten bereits umfangreich untersucht und dokumentiert ist. Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Verfahren zur Auswertung von Mobile Mapping Punktwolken werden diskutiert.

Der Iterative-Closest-Point-Algorithmus

Ein Standardverfahren zur Registrierung von Punktwolken ist der ICP-Algorithmus, der Differenzen zwischen zwei Punktwolken iterativ minimiert (Chen und Medioni, 1991; Besl und McKay, 1992). Für die grundlegenden Verfahren des ICP-Algorithmus von Chen und Medioni (1991) und Besl und McKay (1992) gibt es viele Erweiterungen für spezielle Anwendungen und zur Verbesserung hinsichtlich Laufzeit und erreichter Genauigkeit. Eine Übersicht über unterschiedliche Varianten des ICP-Algorithmus geben z. B. Rusinkiewicz und Levoy (2001). Eine zusammenfassende Einführung sowie eine Auflistung von Arbeiten bis etwa 2008 findet sich bei Vosselmann und Maas (2010), Kapitel 3.3. Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über das Verfahren.

Eine Punktwolke R wird als *Referenz* festgehalten, während eine zweite Punktwolke S , auch als *Source* bezeichnet, transformiert wird, um beide Punktwolken in ein einheitliches Koordinatensystem zu überführen und die Abstände zwischen korrespondierenden Objekten zu minimieren. Der Algorithmus kann in vier Schritte unterteilt werden:

1. Ermittlung der Korrespondenzen zwischen einer Referenzpunktwolke R und der Punktwolke S als Suche der nächsten Nachbarn. Diese iterative Suche stellt den kritischen Schritt zur Bestimmung des globalen Minimums dar.
2. Schätzung der Transformationsparameter (Translation und Rotation) zur Minimierung der Abstände zwischen den Punktwolken (in der Regel als Kleinste-Quadrate-Ausgleichung).
3. Transformation der Punktwolke S mittels der geschätzten Transformationsparameter.
4. Iteration der Schritte 1-3, bis das definierte Abbruchkriterium erfüllt ist.

Die benötigten Korrespondenzen zwischen den Punktwolken können als Punkt-zu-Punkt- oder als Punkt-zu-Ebene-Zuordnung ermittelt werden. Abb. 2.5 (a) stellt die direkte Zuordnung von Punkten der zu transformierenden Punktwolke S (grün) zu den Punkten der Referenz R (rot) dar. Abb. 2.5 (b) zeigt die Zuordnung nächster Nachbarn mittels lokaler Approximation der Oberfläche durch eine Ebene. Die Distanz zwischen den Punktwolken berechnet sich dann aus dem orthogonalen Abstand eines Punktes zum Lotfußpunkt auf der korrespondierenden Ebene der Referenz.



Abbildung 2.5.: Verschiedene Möglichkeiten der Zuordnung korrespondierender Punkte aus zwei Punktwolken für den ICP-Algorithmus mit Referenz- (rot) und transformierter Punktwolke (grün).

Abbruchbedingungen für den iterativen Algorithmus können die quantitative Änderung der Transformationsparameter in aufeinanderfolgenden Iterationen oder der RMS-Fehler der Residuen zwischen korrespondierenden Punkten nach der Transformation sein. Unterschreitet die formulierte Bedingung einen definierten Schwellenwert, bricht der Algorithmus die Berechnung ab.

Die Transformation eines starren Körpers kann durch

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{R}\mathbf{s}_i + \mathbf{t}_0, \quad (2.7)$$

mit Rotationsmatrix \mathbf{R} und Translationsvektor \mathbf{t}_0 beschrieben werden. Die Summe der Quadrate der euklidischen Distanz zwischen den Punkten \mathbf{r}_i der Zielpunktwolke R und ihren nächsten Nachbarn \mathbf{s}_i in der transformierten Punktwolke S wird mit der Bedingung

$$\mathbf{R}^*, \mathbf{t}_0^* = \arg \min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}_0} \sum_i \|\mathbf{R}\mathbf{s}_i + \mathbf{t}_0 - \mathbf{r}_i\|^2. \quad (2.8)$$

minimiert. Die Bestimmung der Rotationsparameter erfolgt unter Verwendung der auf die Schwerpunkte \mathbf{r}_m und \mathbf{s}_m reduzierten Punktwolken

$$\begin{aligned} \mathbf{r}'_i &= \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_m \\ \mathbf{s}'_i &= \mathbf{s}_i - \mathbf{s}_m, \end{aligned} \quad (2.9)$$

mit den Schwerpunkten

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_m &= \frac{1}{n_R} \sum_{i=1}^{n_R} \mathbf{r}_i \\ \mathbf{s}_m &= \frac{1}{n_S} \sum_{i=1}^{n_S} \mathbf{s}_i. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Unter Berücksichtigung der Reduzierung der Punktwolken auf den Schwerpunkt vereinfacht sich die Bedingung in Gl. (2.8) auf

$$\mathbf{R}^* = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_i \|\mathbf{R}\mathbf{s}'_i - \mathbf{r}'_i\|^2. \quad (2.11)$$

Daraus ergibt sich die Minimumsbedingung

$$\mathbf{R}^* = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_i (\mathbf{s}'_i{}^T \mathbf{s}'_i + \mathbf{r}'_i{}^T \mathbf{r}'_i - 2\mathbf{r}'_i{}^T \mathbf{R}\mathbf{s}'_i), \quad (2.12)$$

die minimal wird, wenn der Term $\mathbf{r}'_i{}^T \mathbf{R}\mathbf{s}'_i$ maximiert wird.

Chen und Medioni (1991) wählen einen Ansatz zur Registrierung von Punkten zu Oberflächen, da zwei unstrukturierte Punktwolken in der Regel keine identischen Punkte als Korrespondenzen aufweisen. Der Algorithmus basiert auf der Minimierung der Abstände zwischen den Punkten der einen Oberfläche zu einer lokalen Ebene der zweiten Oberfläche (Abb. 2.5, *b*). Vorteil des Verfahrens ist die schnellere Konvergenz der Punktwolken. Besl und McKay (1992) liefern einen generellen Ansatz zur Registrierung von Punkten, Liniensegmenten, impliziten und parametrisierten Kurven und Oberflächen sowie triangulierten Oberflächen. Der ICP-Algorithmus benötigt zur Zuordnung korrespondierender Punkte eine gute Näherung für die Orientierung der Punktwolken, da jeweils die nächsten Nachbarn in den beteiligten Punktwolken als korrespondierende Punkte angenommen werden. Die Beschreibung der Rotationsparameter basiert auf Quaternionen (nach Horn, 1987), welche die Kleinste-Quadrate-Schätzung der Orientierung in geschlossener Form erlauben.

Adaptierter Iterative-Closest-Point-Algorithmus

In der vorliegenden Arbeit wurde ein adaptierter ICP-Algorithmus genutzt, um hohe Genauigkeiten der Translationsparameter zu erreichen, da Mobile Mapping Punktwolken unterschiedlicher Epochen keine identischen Punkte aufweisen und die Punktwolken zur Verringerung der Rechenzeit ausgedünnt werden sollen. Für die Referenzpunktwolke R und die zu transformierende Punktwolke S werden zwei unterschiedliche Auflösungen (Res_R und Res_S) definiert, die die Dichte der Punktwolken für die weitere Verarbeitung vorgibt. Die Filterung erfolgt in Voxeln mit definierter Kantenlänge, sodass pro Voxel nur ein Punkt erhalten wird. Eine hohe Genauigkeit der Transformationsparameter wird dann über eine Punkt-zu-Ebene-Zuordnung, anstatt Punkt-zu-Punkt, ermöglicht (Eggert und Dalyot, 2012).

Bei diesem Ansatz wird ein Punkt Q auf einer Ebene der k nächsten Nachbarn aus Punktwolke R des Punktes P berechnet, statt direkt einen Punkt r aus der Punktwolke R mit dem kürzesten Abstand für jeden Punkt s der Punktwolke S zu ermitteln. Dieser Punkt Q geht anschließend als nächstgelegener Punkt von P in den ICP-Algorithmus ein. Eine graphische Darstellung des Algorithmus enthält Abb. 2.6. Die Punkt-zu-Ebene-Zuordnung erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst werden für einen Punkt P aus der Punktwolke S (grün) die k nächsten Nachbarn in Punktwolke R (rot) mit einer maximalen Distanz d ermittelt. Danach werden die Punkte aus R trianguliert, um den zu P korrespondierenden Punkt Q zu bestimmen. Mittels Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, PCA) wird eine Ebene durch die k Nachbarn geschätzt, anschließend werden die Punkte auf diese Ebene projiziert. Die Projektion ist erforderlich, damit die Triangulation der Punkte im 2D-Raum erfolgen kann. Anschließend wird der Punkt P auf das nächstgelegene Dreieck in R projiziert, sodass der Punkt Q erzeugt wird. Liegt Q innerhalb eines Dreiecks, wird die Korrespondenz $P \rightarrow Q$ gespeichert, falls der Abstand zwischen den Punkten kleiner als ein definiertes d ist. Der Vorgang wird für alle Punkte der Punktwolke S durchgeführt, sodass für jeden Punkt aus S eine Korrespondenz in Punktwolke R ermittelt wird. Punkte für die kein korrespondierender Punkt Q bestimmt wird, werden im folgenden Schritt zur Schätzung der Transformation nicht berücksichtigt. Die Punkte bleiben aber in der Punktwolke erhalten.

Anhand der Korrespondenzen erfolgt die Schätzung der Transformation in drei Richtungen zwischen den Punktwolken S und R wie im Standard-ICP-Algorithmus, da nun Punktepaare vorliegen. Der gesamte Vorgang mit der Ermittlung der Korrespondenzen wird iterativ wiederholt, bis die Änderung der Transformation unter einem festgelegten Schwellenwert ΔV liegt oder die maximale Anzahl von Iterationen i erreicht wurde. Die Anzahl i wurde empirisch, anhand der Anzahl der maximal benötigten Iterationen bei konvergierten Lösungen, ermittelt, um die Rechenzeit des Algorithmus zu begrenzen.

Bewertung der Ergebnisse des ICP-Algorithmus

Eine Möglichkeit zur Bewertung der Ergebnisse des ICP-Algorithmus oder zur Analyse der beteiligten Punktwolken beschreiben z.B. Gelfand u. a. (2003). Wird nur die Translation in drei Raumrichtungen bestimmt, liefern die Normalenvektoren der korrespondierenden Punkte der beiden Punktwolken direkt die Designmatrix \mathbf{A} . Bei angenommenen gleichgenauen Beobachtungen

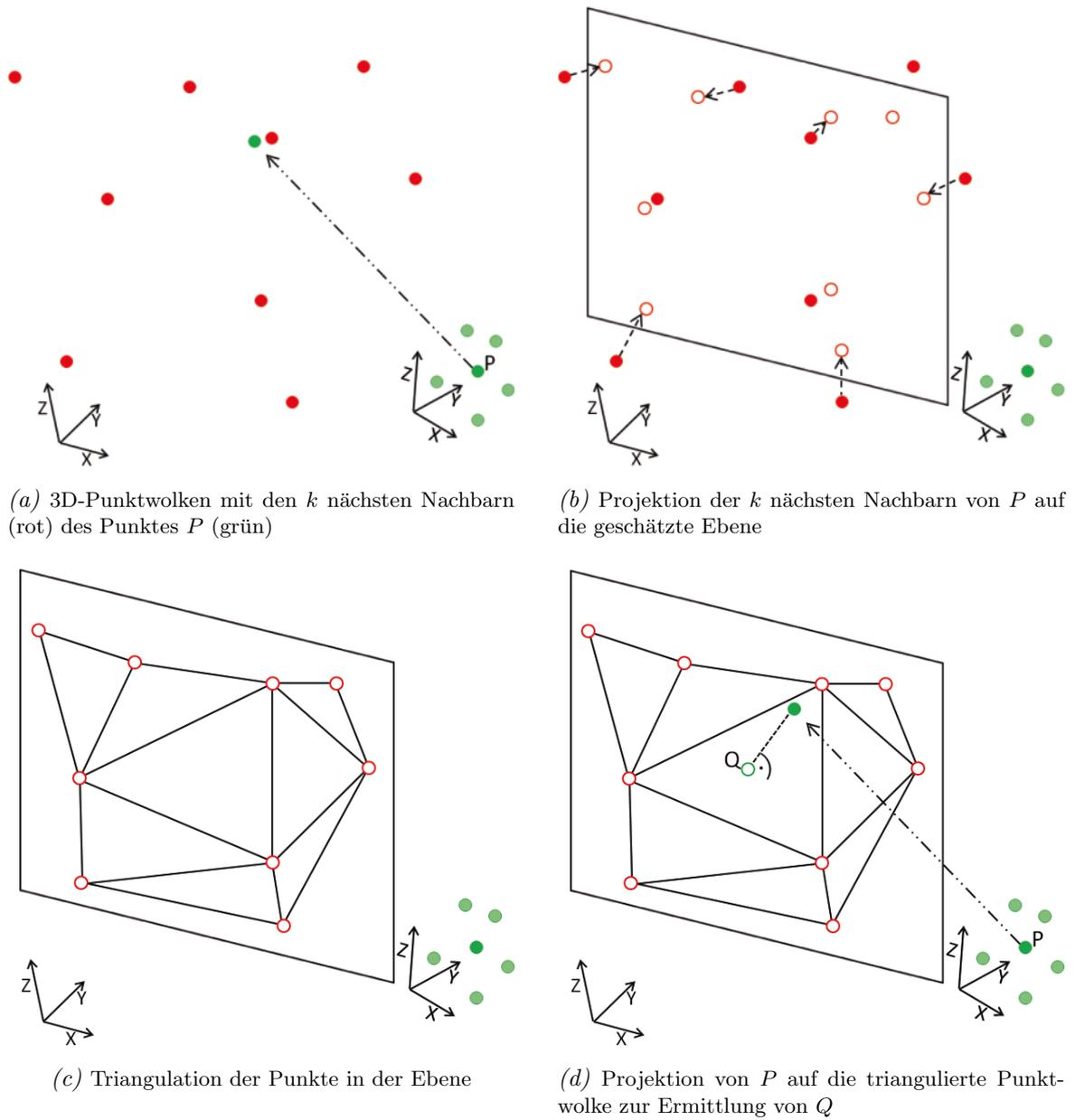


Abbildung 2.6.: Adaptierter ICP-Algorithmus zur Ermittlung von Korrespondenzen mittels Punkt-zu-Ebene-Zuordnung für die Zielpunktwolke R (rot) und die zu transformierende Punktwolke S (grün). Gefüllte Kreise stellen 3D-Punkte dar, ungefüllte Kreise deren Projektion in eine Ebene (nach Eggert und Dalyot, 2012).

wird die Gewichtsmatrix \mathbf{P} als Einheitsmatrix \mathbf{I} angesetzt. Somit ergibt sich die Normalgleichungsmatrix \mathbf{N}_{ll} zu

$$\mathbf{N}_{ll} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} = [\mathbf{n}_1 \dots \mathbf{n}_k] \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1^T \\ \dots \\ \mathbf{n}_k^T \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

mit den Normalen \mathbf{n}_i aller Punkte einer Punktwolke S , für die korrespondierende Punkte in der Referenzpunktwolke R ermittelt wurden. Die Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{xx} ergibt sich daraus mit

$$\mathbf{Q}_{xx} = \mathbf{N}_{ll}^{-1}. \quad (2.14)$$

Eine Spektralzerlegung der Matrix \mathbf{Q}_{xx} liefert dann

$$\mathbf{Q}_{xx} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^T, \quad (2.15)$$

wobei \mathbf{U} die drei Eigenvektoren als Spalten enthält und $\mathbf{\Lambda}$ eine Diagonalmatrix in der Form

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \lambda_2 & \\ 0 & & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ist. Die ermittelte Transformation kann anhand der Konditionszahl c bewertet werden. Da \mathbf{Q}_{xx} positiv definit ist, sind alle Eigenwerte positiv und die Konditionszahl berechnet sich nach

$$c = \lambda_1/\lambda_3, \quad (2.17)$$

wobei die Eigenwerte in absteigender Reihenfolge $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ nummeriert sind. Liegt der Quotient c nahe Eins, d. h. alle Eigenwerte sind näherungsweise gleich, sind für die drei Raumrichtungen ähnlich viele Normalenvektoren vorhanden. Aus der Spektralzerlegung der Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{xx} können zur Darstellung die Halbachsen und Orientierung der Fehlerellipsen bestimmt werden. Die Eigenwerte sind die Quadrate der Länge der Halbachsen, der Eigenvektor zum maximalen Eigenwert definiert über den Winkel zur x-Achse die Orientierung der Ellipse.

Aerotriangulation von Luftbildern

Die Aerotriangulation beschreibt die photogrammetrische Triangulation von Luftbildern, die mit digitalen CCD-Sensoren aus einem Flugzeug Teile der Erdoberfläche flächenhaft erfassen. Eine ausführliche Beschreibung zu diesem Thema findet sich z. B. in Kraus (2004). Die Aerotriangulation erlaubt es, Luftbilder bei einer ausreichend großen Überlappung der einzelnen Aufnahmen ohne GNSS- oder INS-Information mittels Verknüpfungspunkten relativ zu orientieren und anhand weniger Passpunkte, z. B. in einem Landeskoordinatensystem, zu georeferenzieren. Die Verknüpfungspunkte müssen in mehreren Bildern sichtbar sein, allerdings sind für diese keine absoluten Koordinaten erforderlich. Die Passpunkte können als Vollpasspunkte mit 3D-Koordinaten und als Höhenpasspunkte (1D) vorliegen. Die Auswahl und Verteilung der Passpunkte hat großen Einfluss auf die Genauigkeit der Aerotriangulation.

Die beste Genauigkeit bei der Orientierung von Luftbildern wird erreicht, wenn terrestrische Passpunkte an den vier Ecken jedes Bilds zur Verfügung stehen (Abb. 2.7, a). Eine detaillierte Analyse bietet Kraus (2004). Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist diese Verteilung für Bildverbände nicht erreichbar, wobei eine Reduzierung der Passpunkte zwangsläufig zu einer Verringerung der Genauigkeit der Orientierung führt. Die Aerotriangulation bietet die Möglichkeit zur Einsparung von Passpunkten, da der Bildverband insgesamt mit einer minimalen Anzahl von Passpunkten orientiert werden kann. Entscheidend für die Bewertung des Verfahrens ist daher der Genauigkeitsverlust gegenüber der Einzelbildorientierung mit idealer Passpunktverteilung, abhängig von der Anzahl und Verteilung der Passpunkte im Bildverband. Die Lage- und Höhengenaugkeit können getrennt voneinander analysiert werden, da diese bei der räumlichen Aerotriangulation unabhängig voneinander sind, solange ebenes Gelände aufgenommen wurde. In diesem Fall wird die Lagegenau-

igkeit nur von den Lagepasspunkten bestimmt und bleibt von der Verteilung der Höhenpasspunkte unberührt. Gleiches gilt in umgekehrter Weise für die Höhengenaugigkeit.

Kraus (2004) zeigt, dass die Lagegenauigkeit bei Verwendung von nur vier Passpunkten an den Blockecken abhängig von der Blockgröße stark abnimmt und die größten mittleren Fehler in der Mitte der Blockbegrenzungen auftreten. Eine Verbesserung kann erreicht werden, indem Passpunkte entlang der Blockgrenzen gemessen werden, sodass eine Lagegenauigkeit in der Größenordnung eines Einzelmodells erreicht werden kann. Zusätzliche Passpunkte in der Mitte des gemessenen Blocks bringen dagegen keine Verbesserung der Genauigkeit für das Modell. Bei der Abschätzung der Genauigkeit zur Planung muss ebenfalls berücksichtigt werden, dass die Genauigkeit für Einzelpunkte, die nur in einem Stereomodell sichtbar sind, laut Kraus (2004) um etwa 33% geringer ist als in den Überlappungsbereichen des Blocks. Eine größere Anzahl von Verknüpfungspunkten kann diesen Effekt jedoch nicht ausgleichen, die Verknüpfungspunkte helfen dagegen bei der Detektion grober Fehler. Die Höhengenaugigkeit nimmt bei einer geringeren Anzahl von Passpunkten stärker ab als in der Lage, daher werden Höhenpasspunkte in Passpunktketten quer zu den Flugstreifen angeordnet. Die Höhengenaugigkeit des Modells ist abhängig von der Anzahl der Stereomodelle zwischen den Passpunktketten. Für eine hohe Genauigkeit wäre nach drei Stereomodellen die Messung einer Höhenpasspunktkette erforderlich, was wirtschaftlich nicht durchführbar ist. Eine mögliche Verteilung der Passpunkte zeigt Abb. 2.7 (b) mit vier Vollpasspunkten und zusätzlichen Höhenpasspunktketten.

Eine Lösung zur Stabilisierung der Höhengenaugigkeit bei einer geringeren Anzahl von Höhenpasspunkten ist die Verwendung von GNSS/INS-Daten in der Aerotriangulation. Mittels GNSS werden Positionen entlang der Trajektorie erfasst und in der Ausgleichung als Beobachtungen berücksichtigt. Dies erreicht eine Stabilisierung der Ausgleichung in Flugrichtung und erreicht vor allem eine Verbesserung der Höhengenaugigkeit. Da die Projektionszentren in der Regel geradlinig in den Streifen liegen, ist die Querneigung der Streifen trotz GNSS-Information unsicher. Zur Stabilisierung sind Höhenpasspunktketten an den Blockenden oder an jedem Blockende ein Querstreifen mit vier Höhenpasspunkten erforderlich wie in Abb. 2.7 (c) und (d) dargestellt.

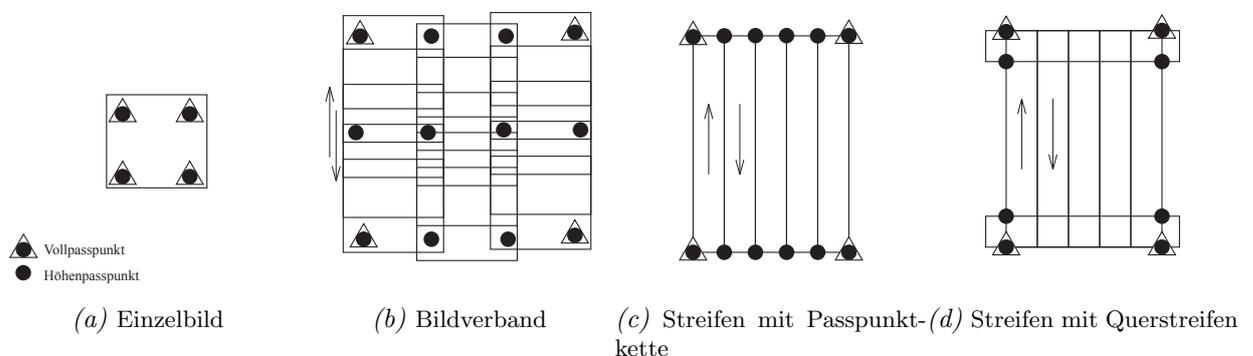


Abbildung 2.7.: Passpunktanordnungen für flugzeugbasierte Systeme (nach Kraus, 2004).

Der Einsatz der GNSS- und INS-Information in der Luftbildauswertung stützt die Aerotriangulation, ein vollständiger Verzicht auf Passpunkte ist jedoch nicht empfehlenswert. Als Gründe nennt Kraus (2004) unter anderem Mehrwegeeffekte aufgrund der Reflexion der Signale an Flugzeugtei-

len, *Cycle Slips* mit einem Verlust der Mehrdeutigkeitslösung der Phasenmessung, welche häufig an Streifenrändern bei Wendemanövern des Flugzeugs auftreten, die aufwändige und möglicherweise fehlerbehaftete relative Kalibrierung der unterschiedlichen Sensoren und Datumsprobleme bei der Transformation der GNSS-Koordinaten in das gewünschte Landeskoordinatensystem.

Streifenausgleichung im flugzeugbasierten Laserscanning

Die Erfassung eines größeren Gebiets mittels Airborne Laserscanning erfordert mehrere überlappende Scanstreifen, deren Orientierung aufgrund systematischer, nicht modellierter, GNSS- und INS-Fehler korrigiert werden muss. In den Überlappungsbereichen der verschiedenen Scanstreifen können Verknüpfungspunkte zur relativen Orientierung der Streifen genutzt werden. Die Verbesserung der Genauigkeit der absoluten Orientierung kann mittels Kontroll- oder Passpunkten, bzw. mit geeigneten Passelementen, erreicht werden. Genutzt werden die Grundlagen der photogrammetrischen Blockausgleichung mittels des Gauss-Markov Modells. Benötigt wird eine stabile Blockgeometrie, die durch eine Reihe überlappender benachbarter Scanstreifen sowie zusätzlicher Querstreifen erreicht wird (Vosselmann und Maas, 2010, Kapitel 3.3). Ermittelt wird eine polynomielle Korrekturfunktion für jeden Streifen, die die Summe der Quadrate der Residuen zwischen korrespondierenden Punkten benachbarter Streifen minimiert. Die Korrektur erfolgt für jeden Streifen mit einem Parametersatz für die Translation und Rotation. Dieser Ansatz berücksichtigt jedoch nicht die physikalischen Ursachen der Residuen, um die Sensorfehler zusätzlich zu modellieren.

Kilian u. a. (1996) nutzen die Information der Verknüpfungs- und Kontrollpunkte für die Streifenausgleichung, in der für jeden Scanstreifen ein Parametersatz zur Transformation in das übergeordnete Koordinatensystem ermittelt wird. Zusätzlich kann das Sensorsystem mit den geschätzten Parametern kalibriert werden. Der Ansatz zur Ausgleichung orientiert sich an der photogrammetrischen Streifenausgleichung mit einem linearen Driftmodell für Position und Höhe, sodass für jeden Streifen 12 unbekannte Transformationsparameter geschätzt werden. Diese setzen sich aus sechs Parametern zur Korrektur von Position und Orientierung sowie sechs Parametern zur Darstellung einer zeitabhängigen Drift der Parameter zusammen. Kager (2004) diskutiert die Korrektur überlappender Scanstreifen, deren Differenzen aus einer nicht ausreichend genauen Systemkalibrierung resultieren. Die Verbesserung korrigiert die Elemente der äußeren Orientierung zur Positionierung mittels GNSS- und INS-Sensoren sowie die relative Orientierung zwischen den verschiedenen Sensoren. Der Ausgleichungsansatz nutzt unterschiedlichen Gruppen von Beobachtungen zur Bestimmung der Unbekannten. Zu den Beobachtungen zählen die Polarkoordinaten der Ankerpunkte der Patches, die jedes Patch definieren, die terrestrisch gemessenen Koordinaten der Passpunkte auf ausgewählten Patches, zusätzlich die fiktive Annahme, dass alle Passpunkte eines Patches in einer Ebene liegen, sowie die Verschiebungs- und Rotationskoeffizienten aller Streifen. Als beobachtete Konstanten gehen die GPS- und INS-Messungen von Position und Orientierung ein. Die zu schätzenden Unbekannten umfassen z. B. die Bodenkoordinaten aller Verknüpfungspunkte der Patches und Passpunkte, die Verschiebungs- und Rotationskoeffizienten der Streifen und drei Rotationen zur Steuerung des Boresight Alignments zwischen INS und Laserscanner. In einem Kleinste-Quadrate-Ansatz minimiert die Ausgleichung die Residuen der beobachteten Patch-Punkte und der Passpunkte unter Berücksichtigung der Patch-Ebenen.

2.8. Segmentierung von Objekten

Zur Auswertung und Analyse von Mobile Mapping Punktwolken ist eine Weiterverarbeitung der Daten erforderlich. Diese umfasst die automatische Segmentierung von geometrischen Primitive oder komplexen Objekten aus Punktwolken, z. B. zur Generierung von Landmarken-Karten oder zur Genauigkeitsanalyse. Der folgende Abschnitt erläutert die notwendigen Werkzeuge zur Segmentierung und Parameterschätzung von Ebenen und Zylindern, da diese Geometrien in urbanen Gebieten häufig enthalten sind. Zu den wichtigsten Hilfsmitteln zählt die Bestimmung von Punktnormalen in einer lokalen Umgebung, die die Oberfläche der Punktwolke repräsentiert. Im Anschluss daran folgt die Anwendung der Punktnormalen zur Segmentierung von Objekten anhand lokaler Bedingungen und für die Parameterschätzung geometrischer Primitive.

Bestimmung von Punktnormalen

Während die Orientierung für Ebenen und Geraden definiert ist, besitzt ein Punkt keine mathematisch definierte Richtung oder Normale. Da die Punkte einer 3D-Punktwolke jedoch die Oberfläche von Objekten repräsentieren, ist die Angabe der Orientierung oder Punktnormalen eines Punktes, approximiert durch seine lokale Umgebung, sinnvoll. Die Normale eines Punktes wird daher durch die Tangentialebene der Oberfläche in diesem Punkt approximiert. Die Bestimmung dieser Tangentialebene kann nach der Methode der kleinsten Quadrate (MkQ) zur Schätzung einer bestangepassten Ebene formuliert werden. Aus einer Punktwolke $P = \{\mathbf{p}_i\}_{i=1,\dots,N}$ soll durch den Punkt $\mathbf{q} \in P$ eine Tangentialebene geschätzt werden, so dass die Summe der quadratischen Abstände aller Punkte zur Ebene minimal wird.

Eine Ebene kann durch

$$a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z + d = 0 \quad (2.18)$$

definiert werden. Die Minimumsbedingung ergibt sich damit zu

$$\sum \mathbf{v}_i^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{v} \rightarrow \min, \quad (2.19)$$

mit der Verbesserung $v_i = ax_i + by_i + cz_i + d$ der Punkte $\mathbf{p}_i \in P$ mit $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]$. Der Normalenvektor der Ebene ergibt sich aus Gl. (2.18) mit $\mathbf{n} = [a, b, c]^T$ unter der Bedingung $\|\mathbf{n}\| = 1$, d beschreibt den Abstand der Ebene zum Ursprung des Koordinatensystems. Somit gilt für die Ebene

$$\mathbf{n}^T \mathbf{p}_i + d = 0. \quad (2.20)$$

Zur praktischen Bestimmung der Ebenenparameter wird häufig das Verfahren der Hauptkomponentenanalyse (PCA) unter Verwendung der Kovarianzmatrix der Punkte angewendet (Rao, 1964). Die PCA liefert mittels Spektralzerlegung die Eigenwerte und Eigenvektoren der Kovarianzmatrix Σ (Niemeier, 2002). Der für die Ebene gesuchte Normalenvektor \mathbf{n} ergibt sich dann aus dem Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert, da bei Ebenen zwei Eigenwerte in der Ebene groß sind, der dritte Eigenwert senkrecht zur Ebene dagegen klein ist. Abb. 2.8 zeigt schematisch die Eigenvektoren einer Ebene (a) im Vergleich mit einem Zylinder (b) mit einem großen und zwei kleinen Eigenwerten.

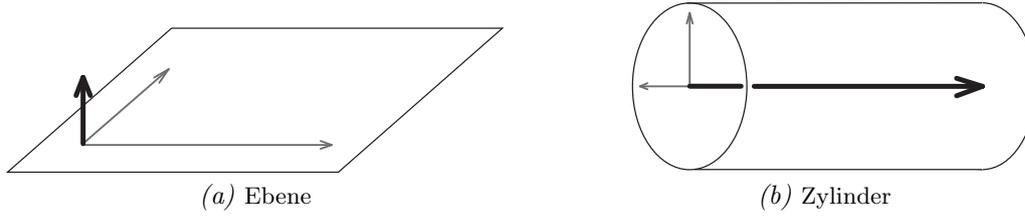


Abbildung 2.8.: Eigenvektoren einer Ebene und im Vergleich zum Zylinder.

Für den 3D-Raum repräsentiert die Matrix

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_k \\ y_1 & \cdots & y_k \\ z_1 & \cdots & z_k \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

k Punkte, wobei jeder Spaltenvektor einen Punkt \mathbf{p}_i liefert. Der Schwerpunkt aller Punkte $\bar{\mathbf{p}}$ berechnet sich aus

$$\bar{\mathbf{p}} = \sum_{j=1}^k \mathbf{p}_j / k. \quad (2.22)$$

Die Punkte \mathbf{p}_i bezogen auf den Schwerpunkt berechnen sich dann aus

$$\mathbf{P}_{red} = \begin{bmatrix} x_1 - \bar{p}_x & \cdots & x_k - \bar{p}_x \\ y_1 - \bar{p}_y & \cdots & y_k - \bar{p}_y \\ z_1 - \bar{p}_z & \cdots & z_k - \bar{p}_z \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Daraus ergibt sich die Kovarianzmatrix Σ der reduzierten Punkte

$$\Sigma = \mathbf{P}_{red} \mathbf{P}_{red}^T = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k p x_{red_i}^2 & \sum_{i=1}^k p x_{red_i} p y_{red_i} & \sum_{i=1}^k p x_{red_i} p z_{red_i} \\ \sum_{i=1}^k p x_{red_i} p y_{red_i} & \sum_{i=1}^k p y_{red_i}^2 & \sum_{i=1}^k p y_{red_i} p z_{red_i} \\ \sum_{i=1}^k p x_{red_i} p z_{red_i} & \sum_{i=1}^k p y_{red_i} p z_{red_i} & \sum_{i=1}^k p z_{red_i}^2 \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Der fehlende Parameter d der Ebene ergibt sich nach Gl. (2.20) und der Festlegung der Parameter a, b, c durch \mathbf{n} mit $d = -\mathbf{n}^T \bar{\mathbf{p}}$, da die geschätzte Ebene durch den Schwerpunkt verläuft.

Die Punkte \mathbf{p}_i müssen aus einer lokalen Umgebung des Punktes \mathbf{q} gewählt werden. Die Wahl der Nachbarn kann z. B. mit einer fest vorgegebenen Anzahl von k nächsten Nachbarn oder über einen definierten Abstand zum betrachteten Punkt erfolgen. Eine Gewichtung der Punkte nach ihrem Abstand zu \mathbf{q} schlägt Vosselmann und Maas (2010), Kapitel 2.1.2 vor. Als Datenstrukturen zur effizienten Suche der Nachbarn in den großen Datenmengen der Punktwolken eignen sich Octrees (z. B. Samet, 1995; Gross und Pfister, 2011) oder k-D-Bäume (Bentley, 1975).

Segmentierung von Objekten mit lokalen Bedingungen

Lokal homogene Eigenschaften von Punkten eignen sich zur Strukturierung einer Punktwolke durch die Unterteilung in unterschiedliche Regionen. Diese Eigenschaften werden als Kriterium zur Trennung der Punkte in einzelne Objekte mathematisch formuliert und können Abstandsfunktionen oder die Ebenheit einer Oberfläche repräsentieren. Als Grundlage für das *Surface-Growing* im 3D-

Raum liefert der von Ballard und Brown (1982) beschriebene Region-Growing-Algorithmus anhand von Grauwerten in Bildern. Beispiele für 3D-Varianten mit unterschiedlichen Homogenitätskriterien finden sich bei Vosselman u. a. (2004) oder Vieira und Shimada (2005).

Der Algorithmus zum Surface-Growing gliedert sich in zwei Schritte: Wahl einer Saatregion und Wachsen der Region unter Beachtung des gewählten Homogenitätskriteriums. Als Kriterien kann die Planarität einer Oberfläche, die Änderung der Normalen benachbarter Punkte oder der Abstand der Punkte zur Saatregion genutzt werden. Die Prüfung der Änderung zwischen Normalen liefert zusammenhängende, stetige Flächen, z. B. Zylinderoberflächen. Das Kriterium des Punktabstands eignet sich zur Zusammenführung oder Trennung einzelner Punktgruppen zu Objekten. Das Homogenitätskriterium der Planarität einer Oberfläche, das der Bedingung

$$|ax + by + cz + d| < \epsilon \quad (2.25)$$

genügen muss, wird im Folgenden detailliert diskutiert:

1. Auswahl einer Saatregion: Ein Punkt wird zufällig aus der Punktwolke ausgewählt. Eine Kugel mit dem Radius r um diesen Punkte definiert die lokale Umgebung. Die so definierte Saatregion wird nach Gl. (2.25) auf Planarität geprüft und verworfen, falls das Kriterium nicht erfüllt ist. In diesem Fall wird ein neuer Saatpunkt zufällig gewählt und die Region wiederum geprüft. Erfüllt eine Region das Kriterium, werden die Ebenenparameter geschätzt und die Ebene kann als Saatregion im zweiten Schritt wachsen.
2. Wachsen der Saatregion: Alle Nachbarn einer Saatregion werden geprüft, ob sie das Kriterium aus Gl. (2.25) erfüllen. Der Grenzwert ϵ wird anhand der Genauigkeit der Messdaten (Rauschen) gewählt. Anschließend werden in einer erneuten Ebenenschätzung die Parameter der Ebene neu bestimmt. Es werden solange neue Nachbarn geprüft, bis keine neuen Punkte der Saatregion hinzugefügt werden können. Anschließend wird die Punkte der ermittelten Ebene als Region zusammen mit den geschätzten Ebenenparametern gespeichert. Alle Punkte, die bereits zu einer Region hinzugefügt wurden, werden markiert und nicht erneut betrachtet. Anschließend erfolgt die Wahl einer neuen Saatregion, bis keine unbearbeiteten Punkte mehr in der Punktwolke vorhanden sind.

Zur Begrenzung der Rechenzeit können zusätzliche Abbruchbedingungen formuliert werden, etwa wenn an einer definierten Anzahl Saatregionen kein Wachstum möglich war. Da die Schätzung der Ebenenparameter rechenintensiv ist, schlagen Vosselmann und Maas (2010), Kapitel 2.3.3 vor, die Neuschätzung erst nach einem festgelegten Anteil von hinzugefügten Punkten (20-50%) durchzuführen. Zur Bereinigung der Daten können zu kleine Regionen im Anschluss an das Surface-Growing aus dem Ergebnis ausgeschlossen werden. Dafür kann die minimale Punktanzahl einer Region festgelegt werden, um Ausreißer zu vermeiden.

Der Random-Sample-Consensus-Algorithmus zur Parameterschätzung geometrischer Primitive

Ausreißer in den Messdaten lassen sich in Vermessungsaufgaben praktisch nicht vermeiden, eine zuverlässige Schätzung von Parametern in einem Modell kann jedoch nur mit fehlerfreien Beobachtungen korrekte Ergebnisse liefern. In der klassischen Vermessung liegen meist nur wenige, gut

kontrollierbare Messwerte bei einer sehr geringen Fehlerrate vor, welche z. B. mit Data-Snooping-Verfahren (Baarda, 1968) aufgedeckt und eliminiert werden können. Weitere Verfahren zur Bestimmung weniger grober Fehler finden sich etwa in Niemeier (2002) oder Luhmann (2003). Bei der Auswertung von Massendaten treten jedoch meist sehr viele Ausreißer auf, sodass die klassischen Verfahren zur Elimination nicht angewendet werden können. Ein Verfahren zur Schätzung der Parameter eines Modells anhand der minimal erforderlichen Anzahl, zufällig ausgewählter, Messungen erläutern Fischler und Bolles (1981) mit dem Random-Sample-Consensus (RANSAC)-Algorithmus. Aus den, in mehreren Iterationen, zufällig ausgewählten Punkten, dem *Random Sample*, wird das Modell berechnet, alle weiteren Messwerte werden gegen dieses Modell getestet und als *Consensus* akzeptiert, wenn ihre Distanz zum Modell geringer ist, als ein zu definierender Schwellenwert ϵ . Die Wahl von ϵ ist abhängig vom Rauschen der Daten, bei stärkerem Rauschen muss dieser Schwellenwert größer gewählt werden. Ein zu kleiner Grenzwert kann dazu führen, dass korrekte Messungen aus den Daten ausgeschlossen werden. Mit einem zu großen Schwellenwert verbleiben fehlerhafte Messungen in den Daten und verfälschen das Ergebnis, indem ein falsches Modell ein großes Consensus-Set erhält.

Die Anzahl der erforderlichen Wiederholungen ergibt sich aus der Anzahl der in den Daten vermuteten Ausreißer w , der Wahrscheinlichkeit z , dass mindestens einmal eine Teilmenge ohne Ausreißer zur Berechnung gewählt wird und der Anzahl, der zur Schätzung mindestens benötigten Messwerte n . Dann ergibt sich die minimale Anzahl k der gewünschten Iterationen zu

$$k = \frac{\log(1 - z)}{\log(1 - w^n)}. \quad (2.26)$$

Sind die geforderten k Iterationen erreicht, wird das Modell mit dem größten Consensus-Set akzeptiert. Soll der Algorithmus bereits vor Erreichen der geforderten Iterationen abbrechen, muss zusätzlich die minimale Anzahl Punkte im Consensus-Set festgelegt werden. Eine gute Näherung ist die Anzahl aller Messungen abzüglich der in den Daten vorhandenen Ausreißer. Der RANSAC-Algorithmus bietet den Vorteil, dass eine signifikante Anzahl von Ausreißern aufgedeckt und eliminiert werden können. Eine Schätzung von Modell-Parametern ist demzufolge mit hoher Genauigkeit trotz einer großen Anzahl Ausreißer möglich. Ein Nachteil des Verfahrens sind die für jeden Datensatz zu definierenden modellabhängigen Schwellenwerte, die von der, häufig unbekannt, Qualität der Daten abhängig sind. Ein weiterer Nachteil stellt die Begrenzung der Laufzeit dar, die möglicherweise verhindert, dass ein optimales Ergebnis ermittelt wird. Die Laufzeit zur Bestimmung der optimalen Parameter hat keine obere Grenze und wird durch die maximale Anzahl Iterationen begrenzt. Ein zu geringes k kann dann zum Abbruch der Schätzung ohne optimales Ergebnis führen.

Verschiedene freie Softwarebibliotheken bieten die Schätzung von Modellparametern für unterschiedliche geometrische Primitive unter Verwendung des RANSAC-Algorithmus an. Für die vorliegende Arbeit sind vorrangig Zylinder und Ebenen interessant, Lösungen bieten Rusu und Cousins (2011) und Schnabel u. a. (2007), die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Eine Schätzung von Zylinderparametern mittels des RANSAC-Algorithmus setzen Rusu und Cousins (2011) in der Bibliothek *Point Cloud Library* (PCL) um. Sind die erfassten Punktwolken so dicht, dass Zylinder einen kreisförmigen Querschnitt aufweisen, kann eine Schätzung der Zylinderparameter auf einem Zylindermodell mit sieben Parametern erfolgen. Die Koeffizienten des Zylinders werden durch einen

3D-Punkt auf der Zylinderachse (x, y, z) , der Achsrichtung und seinem Radius beschrieben. Zur Bestimmung der Parameter werden zwei Punkte auf der Oberfläche des Zylinders mit zugehörigen Normalenvektoren benötigt, das Kreuzprodukt der beiden Normalenvektoren liefert die Achse des Zylinders. Eine Erweiterung des RANSAC-Algorithmus zur Segmentierung von einfachen geometrischen Körpern in großen, ungeordneten Punktwolken stellen Schnabel u. a. (2007) mit der Software *Efficient RANSAC* dar. Im Vergleich zum Standard-RANSAC-Algorithmus, bieten Schnabel u. a. (2007) die Möglichkeit, gleichzeitig mehrere Objekte in einem Datensatz zu ermitteln. Neben Ebenen und Zylindern können die Primitive Kugel, Torus und Kegel geschätzt werden. Schnabel u. a. (2007) lösen das Problem von unterschiedlich dichten Daten und verschieden großen Objekten mit Hilfe von lokalen Stichproben. Da die zufällige Ziehung von Punkten nicht mit einem festen Radius möglich ist, muss zusätzlich die Skalierung für jedes Objekt ermittelt werden. Dies beruht auf einem Octree als hierarchischer räumlicher Datenstruktur. Jede Ebene des Octrees gibt eine Objektgröße vor. Mit der zufälligen Wahl einer Ebene des Octrees wird die Objektgröße festgelegt und die Wahl des Radius ersetzt. Alle Punkte zur Schätzung des Modells werden dann aus derselben Ebene gewählt.

3. Stand der Forschung

Kinematisch eingesetzte Laserscanner liefern schnell große, georeferenzierte Datenmengen. Für die Nutzung und Verarbeitung der Daten spielt die Genauigkeit eine wichtige Rolle, etwa wenn die Punktwolken mit anderen Daten fusioniert oder zur Erstellung von Karten genutzt werden sollen. Die Größenordnung der Genauigkeit kann anhand der Genauigkeitsangaben der Fahrzeugtrajektorie abgeschätzt werden, wenn diese Information vorliegt. Eine detailliertere Aussage kann nur anhand von Referenzdaten oder einer systematischen Datenanalyse getroffen werden. Kapitel 3.1 stellt verschiedenen Verfahren zur Genauigkeitsanalyse von Mobile Mapping Systemen in der Literatur vor. Ist die Genauigkeit für die jeweilige Anwendung nicht ausreichend, müssen die Mobile Mapping Daten verbessert werden. Ansätze aus der Literatur werden in Kapitel 3.2 erläutert. Zusätzlich wird in diesem Abschnitt eine Übersicht zur Auswahl und Verteilung von Passpunkten zur Georeferenzierung in der Literatur vorgestellt.

3.1. Genauigkeitsanalyse von Mobile Mapping Punktwolken

Viele Arbeiten im Bereich der kinematischen Datenerfassung wurden mit Daten aus flugzeugbasiertem Laserscanning durchgeführt. Als Beispiel zeigt Friess (2006) eine ausführliche Diskussion zur Genauigkeit und den unterschiedlichen Fehlern im Airborne-Laserscanning. Der Autor unterscheidet zwischen groben, systematischen und zufälligen Fehlern. Während grobe und zufällige Fehler nur durch redundante Beobachtungen eliminiert werden können, können systematische Fehler modelliert und korrigiert werden. Das Ziel ist eine geometrisch korrekte Punktwolke, deren Genauigkeit mittels der Standardabweichung für einzelne Punkte angegeben werden kann. Die Genauigkeit einer LiDAR-Punktwolke beschreibt die Distanz eines berechneten Punktes zur Position des zugehörigen Objektpunkts, den der Laserstrahl bei der Erfassung getroffen hatte. Der von Friess (2006) beschriebene Ansatz zur Genauigkeitsanalyse nutzt überlappende Scanstreifen mit zusätzlichen Querstreifen, sodass Redundanz in den Überlappungsgebieten entsteht. Zur Analyse werden ebene Verknüpfungs- und Kontroll*objekte*, anstatt von *-punkten*, genutzt. In einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung werden die gewichteten quadratischen Summen der Residuen in den Beobachtungen der Verknüpfungs- und Kontroll*objekte* minimiert. Die Genauigkeit der Scanpunkte in den drei Richtungen x , y und z kann an den Verknüpfungsebenen verifiziert werden, indem die Normalenvektoren der Ebenen durch einzelne Punkte berechnet werden.

In der Literatur finden sich verschiedene Methoden zur Evaluation und Validierung der Genauigkeit speziell von terrestrischen Mobile Mapping Systemen, die Arbeiten von Graefe u. a. (2001), Kremer und Hunter (2007), Haala u. a. (2008), Barber u. a. (2008), Puente u. a. (2012) und Toschi u. a. (2015) stellen eine Auswahl dar. Die unterschiedlichen Ansätze in den genannten Arbeiten werden im Folgenden vorgestellt.

Graefe u. a. (2001) untersuchen die Genauigkeit von Trajektorien des Mobile Mapping Systems MoSES. Dieses ist zur Bestimmung der direkten Georeferenzierung mit dem System Applanix POS/LV 420 ausgestattet und enthält ein INS, GNSS-Empfänger und Antenne und ein Odometer (DMI). Untersucht wurde die Qualität der Trajektorie, die in der Auswertung mit einer kommerziellen Software erreicht werden kann. Das System wurde unter für GNSS typischen Mitteleuropäischen Bedingungen untersucht, nur für 55% der gefahrenen Zeit konnte ein GPS-Signal empfangen werden. Die Genauigkeitsuntersuchung basiert auf Kontrollpunkten entlang der Strecke, die mit dem Stereokamerasystem erfasst wurden. Die Unsicherheiten der Koordinaten aufgrund der photogrammetrischen Messungen wurden im Stand oder bei langsamer Fahrt und unter sehr guten GNSS-Bedingungen getestet und liegen nach Graefe u. a. (2001) unter 10 cm für Nord- und Ost-Wert und unter 5 cm für die Höhe. Für die gesamte 5 km lange Strecke lagen 46 Kontrollpunkte vor. Die resultierende Koordinatenunsicherheit an diesen Punkten lag bei 0,3 m für Nord- und Ost-Wert und 0,5 m in der Höhe. In den Ergebnissen zeigte sich, dass die berechneten RMS-Werte für die Trajektorie auf dieser Route mit 0,2 m aus kommerzieller Software zu optimistisch ausfallen.

Eine Genauigkeitsuntersuchung des Mobile Mapping Systems StreetMapper stellen Haala u. a. (2008) vor. Die Analyse der Punktwolke erfolgt auf Basis eines 3D-Stadtmodells. Unter guten GNSS-Bedingungen kann für die dichte 3D-Punktwolke eine Genauigkeit von rund 3 cm erreicht werden, schlechte Bedingungen führen zu einer verminderten Genauigkeit von etwa 1 m. Barber u. a. (2008) führen ebenfalls eine Studie zur Validierung des operationellen StreetMapper-Systems (Kremer und Hunter, 2007) durch. Sie testen nicht die einzelnen Komponenten des Systems, sondern ausschließlich die Gesamtpunktwolke, wie sie etwa als Produkt einer Dienstleistung zur Verfügung steht. Die Autoren untersuchen die Präzision und Genauigkeit der Position für Lage und Höhe. Die Genauigkeit der Daten wurde mit Hilfe von Kontrollpunkten ermittelt. Aufgrund des hohen Erfassungsaufwands wurden keine tachymetrischen Messungen genutzt, um ein geodätisches Netz zu messen, sondern es wurden in den Testgebieten verteilte Punkte mittels RTK eingemessen. So wurde die Höhenabweichungen anhand von Punkten der Straßenoberfläche und die Lageabweichungen anhand von Eckpunkten an Fahrbahnmarkierungen bestimmt. Die Präzision der Punktwolke wurde mittels mehrfacher Befahrung der gleichen Strecke ermittelt. Für die Analyse wurden Polygone unterschiedlicher Epochen aus der Straßenoberfläche ausgeschnitten und der Abstand ermittelt. Bei diesem Vorgehen kann allerdings nur die Präzision in der Höhe ermittelt werden. Ein Vergleich auf Basis von Fassaden schließen Barber u. a. (2008) aus, da sich verschiedene Effekte (Unsicherheiten in der Strahlweite und „mixed pixels“) möglicherweise nachteilig auf die Präzision von Gebäudekanten auswirken und das Ergebnis verfälschen würden. Die Untersuchungen liefern für die Genauigkeit des Systems in der Höhe, verglichen mit RTK-Punkten, einen RMS Fehler von 0,03 m. Die Präzision, abgeleitet aus mehrfacher Befahrung, liegt in einer ähnlichen Größenordnung. Die Lagegenauigkeit des Systems, verglichen mit Kontrollpunkten an Fahrbahnmarkierungen, liegt bei 0,1 m (1σ) oder 0,2 m mit einem Konfidenzintervall von 95%. Allerdings kann die geringere Genauigkeit auch durch die notwendige Interaktion bei der Punktauswahl entstehen.

Einen Ansatz zur Genauigkeitsuntersuchung mittels Kalibrierobjekt stellen Puente u. a. (2012) anhand eines Lynx Mobile Mapper Systems vor. Das Testgebiet ist in diesem Fall keine urbane Umgebung, sondern ein $3 \times 3 \text{ m}^2$ großes Testfeld mit größtenteils freier Sicht zu Satelliten. Um die Daten auf Konsistenz zu prüfen, wurden Datensätze zu zwei unterschiedlichen Epochen aufgenommen. Das Kalibrierobjekt besteht aus fünf Kugeln mit 100 mm Durchmesser, die auf einem

stabilen Träger befestigt wurden. Die Abstände zwischen den Kugeln wurden mit Hilfe einer Koordinatenmessmaschine hochgenau vermessen. Aus mehreren zeitlich aufeinanderfolgenden Punktwolken wurden die Kugeln extrahiert und die Mittelpunkte der Kugeln mittels Kleinste-Quadrate-Anpassung geschätzt. Die Genauigkeit der Kugel-zu-Kugel-Abstände, und damit die relative Genauigkeit des Systems, liegt bei 10 mm, teilweise bei weniger als 5 mm. Eine Korrelation zwischen der Distanz der Kugeln und der Genauigkeit wurde nicht festgestellt. Die relative Genauigkeit des Systems ist nach Puente u. a. (2012) unabhängig von der GNSS-Qualität. Weiterhin untersuchten Puente u. a. (2012) die absolute Genauigkeit des Systems anhand der globalen Koordinaten der Kugeln. Unter guten GNSS-Bedingungen ($PDOP < 2,5$) wurden im Test Genauigkeiten von 2 - 2,5 cm erreicht, bei schlechteren Bedingungen ($PDOP > 4$) lagen die maximalen Werte in X-Richtung bei 10 cm, in Y-Richtung bei 25 cm und in Z-Richtung bei 30 cm.

Toschi u. a. (2015) werten die Genauigkeit des kommerziellen Mobile Mapping Systems *RIEGL VMX-450* mit statistischen Methoden anhand von zwei unterschiedlichen Referenzdatensätzen aus. Als Referenz wurde ein von Gebäuden eingefasster Platz photogrammetrisch aufgenommen und zusätzlich mittels terrestrischem Laserscanning sehr dichte Punktwolken ausgewählter Gebäude erfasst. Die Auswertung erfolgt über nicht-parametrisierte, statistische Modelle, um ein robustes Ergebnis für die Fehlerverteilung zu erhalten. Der vom Hersteller angegebene Wert der Präzision wurde von den Autoren durch einen Vergleich der beiden Punktwolken einer Epoche bestätigt. Etwas höhere Werte liefert die Auswertung bei einem Vergleich von zwei Punktwolken aus unterschiedlichen Epochen, was möglicherweise durch Fehler in der Georeferenzierung und Veränderungen der Oberflächen hervorgerufen wird. Das große geometrische Potential des Systems zeigen Toschi u. a. (2015) mit Hilfe der Referenzdaten, wobei die mittlere Streuung auf einem großen Platz bei unter 5,9 mm (Vergleich mit Photogrammetrie) und 3,6 mm (Vergleich mit terrestrischem Laserscanning) und damit in dem vom Hersteller angegebenen Bereich von 8 mm (1σ) lag. In engen Straßen nehmen die Fehler aufgrund von hohen Gebäuden und der dadurch hervorgerufenen Abschattung der Satellitensignale zu. Einige Ergebnisse können die Autoren noch nicht vollständig erklären. In den Daten finden sich häufig diagonale Streifen als Fehlermuster. Eine abschließende Erklärung liefern Toschi u. a. (2015) in dieser Arbeit nicht, sie vermuten die Ausrichtung der Scanner oder interne Kalibrierfehler als Grund. Für einen der Referenzdatensätze finden sich zudem größere Fehler (bis zu 7,1 mm), als durch die robuste Fehlerverteilung zu erwarten wären. Die Autoren vermuten Materialeigenschaften als Grund, weitere Untersuchungen sind jedoch zur Verifizierung dieser Aussage notwendig.

3.2. Verbesserung von Mobile Mapping Punktwolken

Die Analyse der Mobile Mapping Punktwolken in der Literatur hat gezeigt, dass die Genauigkeit der Daten für hochgenaue Karten gerade in Städten aufgrund von GNSS-Effekten trotz präziser Messtechnik nicht für alle Anwendungen ausreichend ist. Eine Korrektur der Punktwolken ist daher notwendig, um zuverlässig hohe Genauigkeiten zu erreichen. In der Literatur finden sich verschiedene Methoden zur Verbesserung von mobil erfassten Punktwolken. Neben zwei Ansätzen, die in der lizenzierten Software RiPROCESS (Riegl LMS GmbH, 2011) integriert sind und speziell für die Sensordaten der *RIEGL*-Mobile Mapping Systeme entwickelt wurden, werden in diesem

Abschnitt unterschiedliche voll-automatisierte Verfahren aus der Literatur vorgestellt. Zusätzlich werden zu Beginn Beispiele zur Verbesserung von Punktwolken aus flugzeugbasierten Systemen vorgestellt.

Verfahren im flugzeugbasierten Laserscanning

Habib u. a. (2008) beschreiben einen Ansatz zur Streifenausgleichung von flugzeugbasierten Punktwolken zur Minimierung der Differenzen zwischen überlappenden Streifen mittels Verknüpfungselementen, unter Verwendung einer photogrammetrischen Blockausgleichung. Eine Kalibrierung der Sensor-Effekte erfolgt nicht. Das gewählte Modell erfordert identische Punkte in den unterschiedlichen Streifen, die in Luftbildern leicht identifizierbar sind. In Punktwolken lassen sich dagegen keine identischen Punkte finden, sodass Habib u. a. (2008) lineare Objekte nutzen, welche in den jeweiligen Streifen aus mehreren, nicht-korrespondierenden Punkten bestehen. Die Autoren berücksichtigen dies mit einer künstlichen Erweiterung der Kovarianzmatrix in Richtung der gewählten Linie. Die Zuordnung korrespondierender Linien erfolgt anhand von Abstand, Parallelität und dem Anteil der Überlappung möglicher Kandidaten. Die genutzten Objekte dienen in dieser Arbeit allerdings nur zur relativen Orientierung der Streifen, eine absolute Orientierung mit Kontrollpunkten wird nicht durchgeführt. Rentsch und Krzystek (2009) stellen eine Methode zur Genauigkeitsanalyse mittels automatisch rekonstruierter Dachkanten und -flächen im flugzeugbasierten Laserscanning vor. Die ermittelten Residuen werden in einer Ausgleichung für jeden Streifen minimiert, zur Validierung der Ergebnisse werden Korrespondenzen zwischen benachbarten Scanstreifen genutzt. Die Streifenausgleichung basiert auf den Beobachtungsgleichungen für Kontrollobjekte mit absoluten Koordinaten sowie für Beobachtungen an Verknüpfungsobjekten zwischen überlappenden Streifen. Als Unbekannte werden für jeden Streifen drei Translationen sowie zwei Rotationen geschätzt, der Wankwinkel (*Roll*) als Rotation um die Längsachse des Flugzeugs wird als fest angenommen. Nach der Ausgleichung werden die geschätzten Parameter an die einzelnen Streifen als Korrektur angebracht und die Punktwolke neu berechnet. Zur Validierung des Verfahrens werden die Residuen zwischen korrespondierenden Dach-Objekten der Streifen erneut berechnet und mit den Ergebnissen vor der Ausgleichung verglichen.

Lösungen kommerzieller Softwarepakete

Die Software RiPROCESS (Riegl LMS GmbH, 2011) bietet einen teil-automatischen Ansatz sowie ein voll-automatisiertes Verfahren zur Korrektur der Trajektorie und damit Verbesserung der Punktwolken. Die teil-automatische Korrektur der Trajektorie mittels Punktwolken erfolgt mit dem **Scan Alignment-Tool**. Entlang der Trajektorie werden quaderförmige Bereiche gewählt, in denen Punktwolken aus mindestens zwei Epochen vorliegen. In jedem Quader werden für jede Epoche automatisch Ebenen zur Bestimmung der Verschiebungsvektoren segmentiert, um die Distanz zwischen den Punktwolken zu minimieren. Die geschätzte Translation wird an die Trajektorie angebracht. Eine Korrektur der Rotationen ist ausgeschlossen, da die Orientierung des Systems eine höhere Genauigkeit hat. Für Strecken zwischen zwei aufeinanderfolgenden Quadern werden die Korrekturen linear extrapoliert. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass Kontrollpunkte an Objekten eingeführt werden, die in der Punktwolke eindeutig definiert sind und bekannte Koordinaten mit hoher Genauigkeit haben. Geeignet sind etwa Stangen, deren Fußpunkt als Schnittpunkt zwischen dem Mittelpunkt des Zylinders und dem ebenen Boden identifiziert werden kann. Die

Identifizierung und Messung der korrespondierenden Objekte in der Punktwolke erfolgt manuell. Der Aufwand zur Verbesserung der Punktwolken ist durch die manuelle Bearbeitung bei großen Projekten hoch. Zusätzlich ist das Ergebnis von der Anzahl und Verteilung der Quader abhängig und kann daher je nach Bearbeitung variieren.

Einen vollständig automatisierten Ansatz zur Verbesserung der Scandaten unterschiedlicher Epochen für die RIEGL Mobile Mapping Systeme stellt France (2014) mit der Software *RiPRECISION* vor. Das in RiPROCESS integrierte Werkzeug ermöglicht die Ausgleichung der Punktwolken unter Verwendung der Daten aller verfügbaren Sensoren, d. h. Punktwolken sowie GNSS- und INS-Daten, mit einem Minimum an Interaktion. Zusätzlich zur relativen Korrektur der Punktwolken ist eine absolute Verbesserung der Punktwolken auf Basis von Kontrollpunkten möglich. Die Genauigkeit der erzeugten Punktwolke ist abhängig von der Genauigkeit des Laserscanners, der Genauigkeit der Trajektorie sowie der Kalibrierung des Gesamtsystems, d. h. der Orientierung zwischen den einzelnen Komponenten des Messsystems. Während die Genauigkeiten des Laserscanners sowie der Systemkalibrierung im Bereich weniger Millimeter liegen, erreicht die Trajektorie Genauigkeiten im Bereich einiger Zentimeter bis Dezimeter. Eine detailliertere Beschreibung der genutzten Sensordaten sowie des mathematischen Modells stellt France (2014) nicht vor.

Voll-automatische Ansätze aus der Literatur

Die folgenden voll-automatischen Ansätze aus der Literatur nutzen unterschiedliche Sensordaten als Ausgangsbasis. Huang und Anguelov (2010) nutzen 2D-Scanner zur Erzeugung einer *Latent Map*, um die Fahrzeugpose zu schätzen. Brenner (2016) erweitert diesen Ansatz auf 3D-Daten. Vennegeerts (2011) integriert Rohdaten von GNSS- und Neigungssensoren sowie die Punktwolken eines Laserscanners in einem gemeinsamen Filter. Der Ansatz von Borrmann u. a. (2008) und Nüchter u. a. (2013) deformiert dagegen eine bereits gefilterte Trajektorie eines Mobile Mapping Systems unter Verwendung der Punktwolke, sodass die Abweichungen in den Punktwolken minimiert werden. Die Verwendung zusätzlicher Objektinformation aus einem Stadtmodell beschreibt Pylvanainen u. a. (2010). Die genannten Verfahren werden im folgenden erläutert.

Eine Methode zur Ausgleichung horizontaler Punktwolken stellen Huang und Anguelov (2010) unter Verwendung einer *Latent Map* zur Repräsentation der Geometrie vor. Diese latente Karte, die zu Beginn des Verfahrens nicht bekannt ist, beschreibt die erfasste Umgebung in einem räumlichen Gitter mit stückweise linearen Funktionen. Der Inhalt jeder Zelle wird durch ein lokales Liniensegment repräsentiert, welches durch einen Punkt und den zugehörigen Normalenvektor beschrieben wird. In der Ausgleichung wird eine 3x3-Umgebung der einzelnen Zellen betrachtet, sodass die Konsistenz zwischen den Zellen erhalten bleibt. Eine Standardabweichung wird für jede Zelle abhängig von den enthaltenen Punkten gewählt, um zwischen unterschiedlichen Objekten, Ebenen, Vegetation oder bewegten Objekten, zu unterscheiden. Der von Huang und Anguelov (2010) vorgestellte probabilistische Algorithmus optimiert iterativ die latente Karte sowie die Orientierung zwischen Karte und Punktwolken und damit die Position des Fahrzeugs. Die schnelle Auswertung sehr großer Datensätze basiert auf einer Schätzung der Position in verschiedenen Stufen, wobei zum Schluss alle Ergebnisse der Orientierung der Punktwolken in unterschiedlichen Auflösungen kombiniert werden. Die Auflösung des Gitters wird während der Ausgleichung angepasst. Ein grobes Gitter zu Beginn der Ausgleichung stellt sicher, dass jede Zelle Punkte unterschiedlicher Epochen enthält.

Die Auflösung des Gitters wird in aufeinanderfolgenden Iterationen erhöht, um mehr Details der Umgebung darzustellen, wenn die einzelnen Punktwolken bereits eine gute Orientierung zueinander haben. Zu den Einschränkungen des Algorithmus zählen Huang und Anguelov (2010) die benötigte gute Näherung der Orientierung der Punktwolken zur Lösung und die absoluten Fehler, die sich in großen Gruppen von Laserscans aufaddieren. Dagegen stellen Rauschen, kleine lokale Fehler, Ausreißer, etwa durch bewegte Objekte, sowie eine geringe Auflösung der Scandaten keine Probleme dar.

Eine Generalisierung des Algorithmus der Latent Map von Huang und Anguelov (2010) auf 3D-Laserscans und damit eine dreidimensionale Positionsbestimmung zeigt Brenner (2016) für Mobile Mapping Punktwolken. Das Verfahren liefert eine globale Streifen-Ausgleichung mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern für einen Datensatz mit einer Milliarde Laserpunkte und der Schätzung von 278.000 Unbekannten zur Verbesserung von Position und Orientierung der Trajektorie. Der Ansatz nutzt verschiedene Konzepte zur effizienten Auswertung großer Datenmengen: Einen Ansatz mittels Graphen zur Segmentierung der Scanstreifen, einen alternierenden kleinst-Quadrat-Ansatz zur wechselweisen Optimierung der Trajektorie und der Latent Map sowie die Formulierung des Problems als dynamisches Bayes-Netz, wobei die Kette der Abhängigkeiten zwischen den Trajektorien und Kartenelementen aufgrund der Beobachtungen der Latent Map unterbrochen wird. Die Skalierung des Verfahrens in Raum und Zeit auf sehr große Punktwolken erfolgt durch die mehrfache Anwendung von *MapReduce* (Dean und Ghemawat, 2004). In der Segmentierung wird MapReduce einmalig zur Suche nach kontinuierlichen Regionen zur Repräsentation der Daten in räumlichen Zellen genutzt. Während der *Map-Phase* wird jeder Scanstreifen getrennt segmentiert. In der anschließenden *Shuffle-Phase* werden die segmentierten Objekte anhand ihrer Koordinaten den Zellen zugeordnet. Die *Reduce-Phase* gibt bei der Vorprozessierung nur die Zellen für den nächsten Schritt aus. Die Ausgleichung basiert auf der Methode der kleinsten Quadrate, in der MapReduce iterativ zur Schätzung angewendet wird. In der Map-Phase werden die Normalgleichungen für jede Zelle erstellt. Die Shuffle-Phase gruppiert die Normalgleichungen für die Trajektorien. In der Reduce-Phase erfolgt die Maximum-Likelihood-Schätzung der Verbesserungen separat für jede Trajektorie. Die Ergebnisse der Reduce-Phase gehen jeweils in die nächste Iteration ein.

Ein Verfahren zur Schätzung der Orientierungsparameter kinematischer Aufnahmesysteme auf Basis von GNSS, Inclinometer, inertialem Messsystem kombiniert mit den Messungen eines Laserscanners stellt Vennegeerts (2011) vor. Die Integration der Beobachtungen erfolgt in einem Kalman-Filter. Aus benachbarten Scanlinien des Laserscanners auf ebenen Flächen werden die Winkelgeschwindigkeiten der mobilen Plattform geschätzt, gestützt durch die Messungen des Inclinometers. Die Integration der Beobachtungen in einem Filter erfordert jedoch Zugriff auf die Rohdaten, welche in kommerziellen Systemen meist nicht verfügbar sind.

Einen Ansatz zur Optimierung einer Mobile Mapping Trajektorie auf Basis von Laserscans zeigen Nüchter u. a. (2013). Das Verfahren kalibriert das Gesamtsystem und minimiert die Abweichungen in der 3D-Punktwolke durch Deformation der Trajektorie. Die Optimierung wird auf Basis eines semi-rigiden Scanmatchings zur Schätzung einer global konsistenten Punktwolke durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung zur Optimierung der 3D-Daten mit sechs Freiheitsgraden beschreibt Borrmann u. a. (2008). Das Scanmatching basiert auf der Verwendung eines Octrees, zur Reduzie-

zung der Punktwolke und zur Berechnung der nächsten Nachbarn. Die Schätzung der Korrekturen für die Trajektorie erfolgt in einer Bündelblockausgleichung und wird iterativ ausgeführt. Zur Auswertung der Punktkorrespondenzen muss das, vom Scanmechanismus abhängige, Punktmuster berücksichtigt werden. Zur Bestimmung der Korrektur werden mehrere Punktwolken derselben Umgebung benötigt: Bei Nutzung nur eines 2D-Linienscanners sind daher zwei Fahrten durch das gleiche Gebiet erforderlich, bei zwei Scannern werden Punkte zwischen den verschiedenen Scannern zugeordnet. Für rotierende 3D-Scanner ergibt sich nach jeder vollständigen Umdrehung ein Überlappungsbereich für die Zuordnung. Die Wahl von Scanner-abhängigen, zeitlichen Schwellenwerte verhindert, dass direkt aufeinanderfolgende und daher benachbarte Scanprofile aus derselben Fahrt als nächste Nachbarn verwendet werden. Vorteil des Verfahrens ist es, dass die Trajektorie als Grundlage genutzt wird und keine erneute Kopplung von GNSS- und INS-Daten stattfindet. Das Vorgehen kann daher auch genutzt werden, wenn keine Informationen über das eingesetzte INS-System vorliegen. Allerdings kann der Algorithmus ohne GNSS- oder INS-Daten bislang dazu führen, dass nur ein lokales Minimum für die Punktwolke erreicht wird. Durch die Integration von GNSS-Information soll die globale Genauigkeit der Daten verbessert werden.

Lösungen mit zusätzlicher Objektinformation

Liegt zusätzlich Objektinformation, etwa ein 3D-Stadtmodell, in den erfassten Gebieten vor, wird diese in der Literatur ebenfalls zur Verbesserung der erfassten Mobile Mapping Daten genutzt. Pylvanainen u. a. (2010) beschreiben die Verwendung eines groben 3D-Stadtmodells, um die Drift eines Mobile Mapping Systems in großen Gebieten mittels nicht-starrem ICP-Algorithmus zu korrigieren. Im ersten Schritt werden die Sensordaten des 3D-Laserscanners mittels der GNSS/INS-Information in globale Koordinaten überführt. Die in der Koppelnavigation auftretende Drift und die Positionsfehler des GPS sind nicht-rigide und müssen im folgenden Prozess korrigiert werden. Dazu werden die Scandaten in kleinere Segmente unterteilt, um für jedes Segment die Parameter der Ähnlichkeitstransformation zu bestimmen. Die Übergänge zwischen den Segmenten werden mittels Interpolation geglättet. Die Teilung der Segmente erfolgte an Positionen, an denen bereits zu einem früheren Zeitpunkt Daten mit dem Mobile Mapping System erfasst wurden, d. h. an Kreuzungen. An Kreuzungen werden zum Einen die Fehler der Positionierung in den Daten besonders sichtbar, zum Anderen finden sich besonders viele für den ICP-Algorithmus geeignete Objekte, d. h. Gebäudekanten, in den Punktwolken sowie im 3D-Modell. Aufgrund der stark vereinfachten Darstellung der Gebäude im 3D-Modell wird nur die größte Fläche eines Gebäudes zur Zuordnung genutzt.

Auswahl und Verteilung von Passpunkten

Pass- oder Kontrollpunkte spielen bei der globalen Georeferenzierung von Geodaten eine wichtige Rolle, vor allem für die erreichbare Genauigkeit. Der folgende Abschnitt stellt verschiedene Analysen zur Verwendung von Passpunkten für flugzeugbasierte Bildverbände sowie in der Streifenausgleichung von aus der Luft aufgenommenen Punktwolken vor.

Einen Einsatz von Passpunkten und Passlinien zur Orientierung von Dreiergruppen hochauflöster Satellitenbilder beschreiben Cao u. a. (2016). Die Linien können Passpunkte ersetzen, wenn nicht genügend Passpunkte vorliegen. Der Einsatz von Passlinien ist auch geeignet, wenn Kontrollobjekte

aus topographischen Karten extrahiert werden sollen, da diese mehr linienhafte als punktförmige Objekte enthalten. Cao u. a. (2016) weisen darauf hin, dass die Linien nicht vollständig identisch sein müssen, um eine Ausgleichung zu erlauben. Im Mittelpunkt der Analyse steht der Test verschiedener Kombinationen aus Passpunkten und Passlinien mit unterschiedlicher Anzahl und Verteilung der Passobjekte. Eine hinreichend gute Genauigkeit der Orientierung der Bilder, die den Autoren für die Analysen als Referenz dient, liefern vier Passpunkte in den Bildecken oder acht Passlinien, die an den Bildrändern mit unterschiedlicher Orientierung vorhanden sein müssen. Eine weitere Erhöhung der Anzahl der Passlinien zeigte dagegen keine weitere Steigerung der Genauigkeit. Die durchgeführten Experimente zeigen, dass neben der Anzahl der Linien die Orientierung der Objekte eine wichtige Rolle für die Genauigkeit der Bildorientierung spielt. Wird der Bildraum in vier Richtungen aufgeteilt, müssen die Linien mindestens zwei der Richtungen abdecken, d. h. deutlich unterschiedliche Orientierungen aufweisen. Nach Cao u. a. (2016) liefern die Kombinationen aus drei Passpunkten und einer Passlinie, zwei Passpunkten sowie zwei Passlinien oder einem Passpunkt und fünf Passlinien ebenso gute Genauigkeiten wie die Referenz mit vier Punkten oder acht Linien. Allerdings weisen die Autoren darauf hin, dass der Ansatz bislang nur an zwei Datensätzen mit jeweils drei Bildern evaluiert wurde und daher für eine allgemeine Aussage weitere Analysen notwendig sind.

Passelemente für die Höhe können horizontale Ebenen darstellen, deren Parameter anhand terrestrischer Messungen bestimmt werden können. Kilian u. a. (1996) nennt z. B. Kreuzungen als geeignete Höhenpasspunkte. Die Lagegenauigkeit der Daten kann mit Hilfe von linien- oder flächenhaften Passelementen erreicht werden. Einzelne Punkte sind nicht geeignet, da eine Zuordnung identischer Punkte nicht möglich ist. Geeignet sind etwa Eckpunkte von Gebäuden, deren Koordinaten terrestrisch bestimmt und als Lagepasspunkte genutzt werden können (Kilian u. a., 1996). Kager (2004) beschreibt die Verwendung von Kontrollobjekten, statt Kontrollpunkten, zur Streifenausgleichung von Airborne Laserscanning. Geeignete Verknüpfungsobjekte in den Überlappungsbereichen der Scanstreifen werden automatisch detektiert. Genutzt werden ebene Objekte, die Kager (2004) als *homologe Objekte* bezeichnet. Die Verknüpfungsebenen liefern allerdings jeweils nur eine Information in Richtung der Oberflächennormalen, während zwei Freiheitsgrade verbleiben. Daher werden bei Verwendung von Ebenen drei sich schneidende Ebenen benötigt, um einen Passpunkt zu ersetzen. Diese zusammengesetzten Objekte nennt Kager (2004) zur Vereinfachung *Patch*. Bei der Auswahl der Passpunkte zur Stützung der Genauigkeit gibt Kager (2004) einschränkend an, dass die ideale Konfiguration von Passpunkten bislang nicht untersucht wurde. Daher schlägt er das Vorgehen aus der GPS-gestützten Aerotriangulation vor: Als minimale Verteilung der Passpunkte sollten vier Vollpasspunkte an den Ecken des erfassten Gebiets genutzt werden. Zusätzlich ist eine dichte Anordnung von Höhenpasspunkten quer zu den erfassten Streifen an den Blockrändern und als Passpunkt-kette zur Stützung in der Mitte der Streifen empfehlenswert. Werden zusätzliche Streifen quer zu den dichten Blockstreifen erfasst, reduziert sich die Anzahl der Höhenpasspunkte auf einige wenige Objekte im mittleren Querstreifen. Als Höhenpasspunkte nutzt Kager (2004) z. B. Fußballfelder.

4. Hochgenaue Karten

Dieses Kapitel verbindet klassische Karten, wie etwa topografische Karten oder Katasterdaten, mit den Verfahren der mobilen Erfassung mittels LiDAR. Die verfügbaren und in der Arbeit genutzten Daten werden in Kapitel 4.1 vorgestellt. Ein umfangreicher hochgenauer Datensatz, für den Fassaden und Straßenprofile mittels Tachymeter auf Basis eines geodätischen Netzes erfasst wurden, ergänzt das Datenmaterial (Kapitel 4.2). In Kapitel 4.3 erfolgt eine Analyse der amtlichen Datenbestände hinsichtlich Genauigkeit und Aktualität mit Blick auf die Verwendungsmöglichkeit zur Genauigkeitsanalyse und Verbesserung von Mobile Mapping Punktwolken. Ein Anwendungsbeispiel zur Lokalisierung von Fahrzeugen mittels Landmarken-Karten in Kapitel 4.4 verdeutlicht das Potential mobil erfasster Geodaten.

4.1. Verfügbare Geodaten

Die Bereitstellung amtlicher Geobasisdaten ist in der Bundesrepublik Deutschland Aufgabe der Landesvermessung der Bundesländer. Zu den Geobasisdaten zählen die Topografie zur Beschreibung der Landschaft und die Liegenschaften mit Informationen über Gebäude und Grundstücke. Grundrisse von Gebäuden werden in den Katasterämtern erfasst und in einem Liegenschaftskataster geführt. Die Bereitstellung und Verarbeitung erfolgte bis vor einigen Jahren im *Automatisierten Liegenschaftsbuch* (ALB) sowie der *Automatisierten Liegenschaftskarte* (ALK). Die Zusammenführung im *Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem* (ALKIS) integriert die Daten aus den unterschiedlichen Quellen. Eine Beschreibung findet sich im AFIS-ALKIS-ATKIS-Modell (AdV, 2015). Für visuelle Analysen der Daten eignen sich Orthophotos, die bei den Landesvermessungsämtern der Bundesländer erworben werden können. Jedes Bundesland regelt die Bereitstellung und Aktualisierung der Daten für das eigene Landesgebiet. Zusätzliche lokale Geodaten, etwa die Koordinaten von Ampeln oder Bäumen, werden dezentral in den kommunalen Fachbereichen erfasst (z. B. Landeshauptstadt Hannover, 2012). Länderübergreifende Daten, z. B. das Modell des Quasigeoids, stellt das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2016) zur Verfügung. Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Geodaten am Beispiel von Niedersachsen und der Stadt Hannover vorgestellt.

Für diese Arbeit wurden vom Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) Orthophotos und Gebäudegeometrien aus ALKIS für ein ausgewähltes Gebiet bereitgestellt. Digitale Orthophotos liegen in Niedersachsen landesweit vor und werden jährlich für ein Drittel der Fläche des Bundeslands aktualisiert (LGLN, 2017). Die Orthophotos stehen in Kacheln von $2 \times 2 \text{ km}^2$ mit einer Bodenauflösung von $20 \times 20 \text{ cm}^2$ oder $40 \times 40 \text{ cm}^2$ zur Verfügung. Die geometrische Genauigkeit der digitalen Orthophotos wird in den Metadaten mit 0,4 m angegeben. Die zur Verfügung gestellten Gebäudegeometrien liegen als Eckpunkte der Gebäude vor und stammen aus unterschiedlichen Quellen: Aus amtlicher Vermessung, durch Übernahme aus

der ALK-Punktdatei ohne Verknüpfung mit der Geometrie oder abgeleitet aus der Geometrie der Gebäudefläche. Die verschiedenen Datenquellen können zu unterschiedlicher Genauigkeit und Aktualität führen. Punkte aus amtlicher Vermessung können messtechnische Qualitätsangaben enthalten, z. B. zur Genauigkeit und Unsicherheit der Daten, aber auch zeitliche Angaben, wie das Jahr der Erfassung oder der Überprüfung. Im Testgebiet wurden die Gebäudegeometrien vorrangig aus einer 1:1-Digitalisierung der ALK generiert und entsprechen den analogen Rahmenflurkarten im Maßstab 1:1000.

Kommunale Vermessungsaufgaben für die Stadt Hannover übernimmt der Bereich Geoinformation des Fachbereichs Planen und Stadtentwicklung der Landeshauptstadt Hannover. Die Aufgaben umfassen z. B. Liegenschaftsvermessung städtischer Grundstücke, topografische Vermessungsaufgaben und Ingenieurvermessung. Großmaßstäbige Karten, wie die Stadtkarte im Maßstab 1:1000 oder 1:5000, sowie thematische Karten können digital bezogen werden (Landeshauptstadt Hannover, 2012). Für die vorliegende Arbeit wurde ein Ausschnitt der Stadtkarte Hannover 1:1000 (SHK1000) vom Bereich Geoinformation der Stadt Hannover erworben. Daraus sind die Informationen über die Straßen- und Wegetopografie, Ampeln sowie Bäume entlang der erfassten Trajektorie zur Analyse nutzbar. Die Daten wurden aus der analogen Stadtkarte digitalisiert, die Aktualisierung erfolgt über die Auswertung von Luftbildern und topografischen Vermessungen. Aus der Digitalisierung ergibt sich die Einschränkung der Genauigkeit der Daten auf graphische Genauigkeit. Der Datensatz enthält sowohl punktförmige als auch linienförmige Objekte mit bis zu 50 m Abstand entlang einer 20 km langen Trajektorie im Stadtgebiet von Hannover. Damit die Daten für eine Landmarken-Karte geeignet sind, müssen die Objekte als Landmarken für einen Sensor, z. B. einen Laserscanner, detektierbar sein. Die Objekte der Stadtkarte wurden daher auf ihr Potential zur automatischen Segmentierung aus Punktwolken untersucht. Geeignete Objekte sind Bäume und Ampeln, da die zylindrische Form der Masten und Baumstämme aus Punktwolken automatisch segmentiert werden können. Bei Sinkkästen in der Straße muss nach der Form unterschieden werden. Runde Sinkkästen werden im Mittelpunkt aufgemessen, sodass die Koordinaten des Mittelpunkts in einer Punktwolke aus den segmentierbaren Randpunkten geschätzt werden können. Die Koordinaten eckiger Straßensinkkästen werden ebenfalls nur an einem Punkt erfasst. Da der Bezugspunkt nicht bekannt ist, können diese Objekte keinem Punkt der Punktwolken eindeutig zugeordnet werden. Die Straßen- und Wegetopografie umfasst teilweise die in der Punktwolke sichtbaren Bordsteine, die zur Analyse genutzt werden können. Die Anzahl der Objektarten entlang der ausgewerteten Trajektorie sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. In den Punkt-Objekten finden sich Bäume am häufigsten. Da keine Informationen über Durchmesser oder Umfang der Stämme in den Daten enthalten sind, können die Daten nicht nach Bäumen mit begrenztem Umfang gefiltert werden. Daher reduziert sich die Anzahl geeigneter Bäume gegenüber der in Tabelle 4.1 angegebenen Zahl, da Bäume mit großem Durchmesser nicht als zylindrische Objekte angenommen werden können. Ampeln finden sich in deutlich geringerer Anzahl in den Daten. Es sind freistehende zylindrische Objekte, die in der Punktwolke segmentiert werden können. Sie treten vor allem an größeren Kreuzungen in Gruppen auf, an großen Streckenabschnitten finden sich daher keine Ampelobjekte. Weitere geeignete zylindrische Objekte, wie Masten von Verkehrszeichen oder Straßenbeleuchtung, sind in der Stadtkarte nicht enthalten. Runde Straßensinkkästen treten sehr selten entlang der untersuchten Trajektorie auf, sie können nur ausgewertet werden, wenn ein Sensor die Straßenfläche erfasst und die Objekte nicht durch andere Fahrzeuge verdeckt

werden. Die Anzahl der Linien-Objekte *Straßen- und Wegetopografie* ergibt sich aus den einzelnen Abschnitten der Objekte aus der Digitalisierung. Nicht alle dieser Linien sind für die Segmentierung aus Punktwolken geeignet, da die Objekte nicht nur sichtbare Bordsteine umfassen, sondern alle Begrenzungen von Straßen- und Wegflächen.

Tabelle 4.1.: Ausgewählte Objekte der Stadtkarte Hannover im Maßstab 1:1000 entlang einer ca. 20 km langen Strecke im Stadtgebiet von Hannover. Angabe mit Häufigkeit und Automatisierungsgrad zur Segmentierung aus Punktwolken.

Objekt	Anzahl	Segmentierung
Punktförmige Objekte		
Bäume	3020	automatisch
Ampeln	314	automatisch
Straßensinkkästen, rund	10	(teil-) automatisch
Linienförmige Objekte		
Straßen- und Wegetopografie	5920	Bordsteine automatisch

4.2. Ein hochgenaues Referenzpunktfeld

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Referenzdaten ist die geodätische Aufnahme eines Testfelds mittels GNSS und Totalstation. Eine hohe Genauigkeit wird mit Hilfe eines geodätischen Netzes zur Bestimmung von Anschlusspunkten erreicht. Auf dieser Basis kann ein Testfeld aus speziellen Zielmarken oder natürlichen und anthropogenen Objekten aufgenommen werden. Der folgende Abschnitt beschreibt die Aufnahme eines geodätischen Netzes, dessen globale Lagerung mit statischen GNSS-Messungen erfolgt, und die darauf basierende Aufnahme eines Testfelds auf Fassaden und Straßenprofilen.

Hochgenaue lokale Referenz mittels geodätischem Netzwerk

Für das Referenzpunktfeld musste eine lokale Referenz mit einer ausreichenden Anzahl Anschlusspunkte hoher Genauigkeit geschaffen werden. Im Rahmen der Vermessung sollen für die freie Stationierung für jeden benötigten Standpunkt drei Anschlusspunkte sichtbar sein. Die Punkte des Netzwerks wurden sorgfältig ausgewählt, um ein stabiles Netz zu erreichen, da aufgrund der Bebauung keine diagonale Verbindungen zwischen den Eckpunkten des Netzes beobachtet werden konnten. Insgesamt wurden 17 Netzpunkte mit Stahlmessbolzen fest vermarktet. Für eine höhere Stabilität wurden benachbarte Punkte, so weit unter den örtlichen Gegebenheiten möglich, auf gegenüberliegenden Straßenseiten gesetzt. Netzpunkte, die nicht auf Kreuzungen gesetzt wurden, sollten von mindestens drei weiteren Netzpunkten sichtbar sein. Aufgrund von Verdeckungen durch geparkte Fahrzeuge konnte diese Bedingung für zwei Punkte (112 und 510) nicht erfüllt werden. Die Geometrie der Netzpunkte zeigt Abb. 4.1.

Die Vermessung der Netzpunkte wurde mit einer Totalstation Leica TS 30, mit einer Streckenmessgenauigkeit von 0,6 mm + 1 ppm und einer Richtungsmessgenauigkeit von 0,1 mgon durchgeführt (Leica Geosystems GmbH, 2016). Für hohe Genauigkeiten erfolgte die Messung aller Punkte unter

Zwangszentrierung mit Standardprismen auf Stativen. Das Netz wurde an einem Tag vollständig vermessen, den Abschluss bildete eine Messung zum Startpunkt als Schleifenschluss. Näherungskoodinaten für jeden Netzpunkt für die Ausgleichung wurden mittels RTK-GPS bestimmt.

Die Ausgleichung des geodätischen Netzes wurde als Freie Netzausgleichung mit Gesamtspurminimierung berechnet. Die resultierende Standardabweichung für die 2D-Position liegt zwischen 0,4 mm und 1,1 mm mit einem Mittelwert von 0,5 mm. Die Höhe der Punkte kann mit einer Standardabweichung zwischen 0,6 mm und 1,3 mm angegeben werden (1σ). Die Standardabweichung für alle Netzpunkte ist in Abb. 4.1 durch graue Ellipsen (skaliert) dargestellt. Die größte Standardabweichung in der Lage tritt bei Punkt 480 auf, die Länge der großen Halbachse beträgt 1,1 mm. Aufgrund der günstigeren Geometrie wird für die Punkte an Kreuzungen eine höhere Genauigkeit erwartet, was durch kleine, kreisförmige Ellipsen bestätigt wird, z. B. für die Punkte 200 oder 450 im Vergleich zu den Punkten 350 und 480, die innerhalb von Straßen liegen.

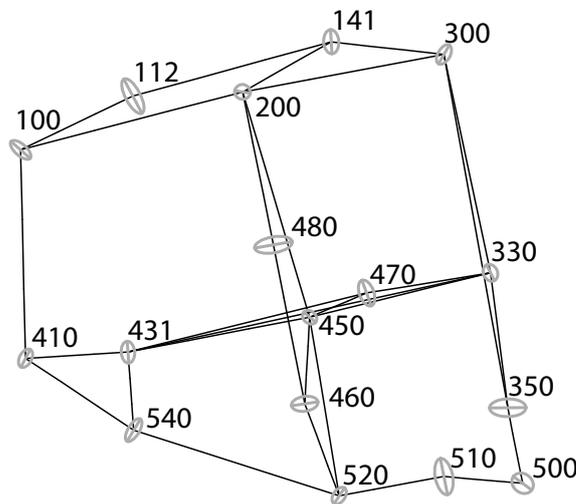


Abbildung 4.1.: Geodätisches Netz mit Standardabweichung der Netzpunkte als graue Ellipsen (skaliert). Punkt 480 hat eine Standardabweichung von 1,1 mm (1σ , große Halbachse). GNSS-Messungen auf den Punkten 100, 300 und 500. Netzausdehnung etwa 300 m x 300 m.

Globale Lagerung durch statische GNSS-Messungen

Die globale Lagerung des geodätischen Netzwerks wurde mit Hilfe statischer GNSS-Messungen auf drei Netzpunkten bestimmt. Für eine hohe Stabilität wurden die Punkte an den äußeren Ecken des Netzes gewählt (Abb. 4.1, Punkte 100, 300 und 500) und jeweils zweimal über einen Zeitraum von je 2 h beobachtet. Die Zwangszentrierung wurde mit Hilfe spezieller Halterungen realisiert, die einen simultanen Aufbau von Prisma und GNSS-Antenne erlauben. Die Messungen erfolgten mit dem Leica System 1200 mit Leica ATX1230 SmartAntenna und RX 1210 Empfänger im statischen Modus, mit Aufzeichnung der Rohdaten mit einer Datenrate von 1 s. Während der Messung wurden Korrekturdaten einer AXIO-NET Referenzstation in Echtzeit empfangen (AXIO-NET GmbH, 2017). Für die Nachverarbeitung wurden Daten einer lokalen SAPOS Referenzstation mit einer Datenrate von 1 s genutzt (AdV, 2017).

Die Nachverarbeitung erfolgte in der Software Leica *GeoOffice*. Zur Auswertung wurde ein Elevationswinkel von 20° festgelegt, da sich in der Umgebung der GNSS-Punkte teilweise Hinder-

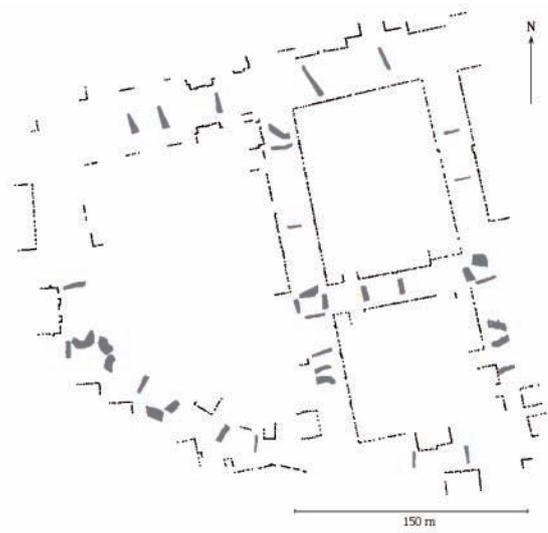
nisse bei geringerer Elevation befanden. Die Lösung wurde ausschließlich unter Verwendung der GPS-Beobachtungen mit der L1-Frequenz mit fixierter Phasenlösung und präzisen Ephemeriden berechnet. Die Koordinaten der Punkte wurden mit einer Standardabweichung von 6,6 mm (1σ) bestimmt.

Referenzpunktfeld mit Objekten der Umgebung

Das Referenzpunktfeld für diese Arbeit nutzt ausschließlich vorhandene Objekte der Umgebung und verzichtet auf eine Signalisierung mit Zielmarken. Dies hat den Vorteil, dass kein Testfeld aufgebaut oder gepflegt werden muss. Hauptanforderungen an die Objekte waren eine gute Sichtbarkeit der Objekte von öffentlichen Straßen und die Abdeckung unterschiedlicher Orientierungen durch die Punkte des Referenzpunktfelds, sodass eine Analyse aller drei Raumrichtungen möglich ist. Abb. 4.2 (a) zeigt eine Übersicht des Testgebiets mit den Fassadenpunkten (rot), ergänzt durch Orthophoto, Gebäudegrundrisse und Straßenbegrenzung aus Katasterdaten. Erkennbar sind die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte der Daten. So findet sich im unteren Bildteil mittig ein Gebäudegrundriss der in der Realität nicht mehr existiert, sondern durch ein neues Gebäude ersetzt wurde.



(a) Fassadenpunkte (rot) mit Orthophoto, Grundrissen und Straßenbegrenzung



(b) Fassadenpunkte (schwarz) und Straßenprofile (grau)

Abbildung 4.2.: Referenzdaten in einem Testgebiet in Hannover mittels Tachymeter erfasst, Ausdehnung etwa $300\text{ m} \times 300\text{ m}$. Zusatzinformationen LGLN (2017)

Das Referenzpunktfeld mit einer Ausdehnung von $300 \times 300\text{ m}^2$ wurde mit einem Tachymeter Leica Nova MS 50 MultiStation (Leica Geosystems GmbH, 2016) innerhalb von vier Tagen erfasst. Zusätzlich zur reflektorlosen Messung von Einzelpunkten bietet das Instrument die Möglichkeit, 3D-Daten einer zu definierenden Fläche im Scanning-Modus mit wählbarer Punktdichte zu erfassen. Die integrierte Koaxialkamera mit einem 5 MPixel CMOS Sensor wurde für das aufgenommene Referenzpunktfeld nicht genutzt. Die Genauigkeit der Streckenmessgenauigkeit ohne Reflektor wird vom Hersteller mit $2\text{ mm} + 2\text{ ppm}$ für alle Oberflächen bei einer maximalen Reichweite von 2000 m angegeben. Da die Fassaden in einem Abstand von 20 m - 30 m erfasst werden, ist der stre-

ckenabhängige Anteil der Genauigkeit vernachlässigbar. Die Genauigkeit der Richtungsmessung liegt laut Hersteller bei 0,3 mgon.

Die Instrumenten-Standpunkte wurden während der Vermessung als freie Stationierung unter Verwendung der Netzpunkte als Anschlusspunkte berechnet. Die Qualität der Stationierung wird für jeden Standpunkt direkt vom Gerät ausgegeben und liegt im Mittel für die Lage bei 0,8 mm und für die Höhe bei 1,2 mm (Maximum in der Lage 1,6 mm und Höhe 2,9 mm). Insgesamt wurden rund 4000 Punkte auf Fassaden gemessen, jede Ebene mit bis zu 20 Einzelpunkten (Abb. 4.2 (b), schwarze Punkte). Kleine Flächen an Vorsprüngen und Hauseingängen wurden zusätzlich aufgenommen. Die Zuordnung der Punkte zu Ebenen erfolgt über die Punktnummer, die für jede Ebene eine eindeutige ID enthält. Die Kontrolle der Höhe erfolgt anhand von Straßenprofilen, in Abb. 4.2 (b) durch graue Flächen dargestellt. Die Profile wurden manuell definiert und im automatischen Scanning-Modus der MultiStation mit einer Punktdichte von 1 cm - 5 cm erfasst. Insgesamt wurden 37 Profile quer zur Straßenmittelachse mit einer Breite von etwa 1 m aufgenommen. Die Profile enthalten rund 550.000 Punkte, die für die spätere Auswertung ausgedünnt werden können.

Die Standardabweichung der Referenzpunkte ergibt sich mittels Fehlerfortpflanzung aus

$$\sigma_{Ref} = \sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_S^2 + \sigma_M^2}, \quad (4.1)$$

mit der Standardabweichung der Netzpunkte σ_N , der Standardabweichung der Stationierung σ_S sowie der Messgenauigkeit der eingesetzten MultiStation σ_M und kann mit 2,2 mm für die Lage und 2,4 mm für die Höhe angegeben werden (maximal 2,8 mm Lage und 3,7 mm Höhe).

4.3. Analyse der verfügbaren Karten

Die Verifizierung der Genauigkeit von Karten aus Mobile Mapping Punktwolken erfordert geeignete Referenzdaten mit bekannter Genauigkeit. Die Referenzdaten sind geeignet, wenn ihre Genauigkeit eine Größenordnung besser ist, als die erwartete Genauigkeit der Punktwolken. Zusätzlich müssen korrespondierende Objekte in Referenz und Punktwolke vorliegen, eindeutig identifizierbar sein und aus der Punktwolke segmentiert werden können. Dieser Abschnitt untersucht das Potential von Kartenmaterial aus amtlichen Datenquellen als Kontrolldaten für Punktwolken. Berücksichtigt wird in diesem Zusammenhang sowohl die Lagegenauigkeit als auch die geometrische Genauigkeit und Aktualität der Daten. Die Analyse der ALKIS-Daten erfolgt mit Hilfe des vorgestellten terrestrischen Referenzdatensatzes sowie mit kinematisch erfassten Punktwolken.

Analyse der amtlichen Geodaten mit hochgenauen Referenzdaten

Die Analyse wurde mit den hochgenauen Referenzdaten (Kapitel 4.2) durchgeführt. Für die insgesamt 4018 erfassten Referenzpunkte auf Fassaden wird die Distanz zu den korrespondierenden Gebäudepolygonen der ALKIS-Daten bestimmt und analysiert. Eine visuelle Analyse der Daten zeigt bereits große Unterschiede zwischen den Daten im Testgebiet. Abb. 4.3 (a) zeigt ein Beispiel, an dem ein Gebäude abgerissen und leicht versetzt ein Neubau mit anderem Grundriss errichtet wurde. Die Punkte des neuen Gebäudes dürfen daher nicht in der Auswertung der Distanzen berücksichtigt werden. Zusätzlich wurden Referenzpunkte auf großflächigen freistehenden Mau-

ern erfasst. Diese Punkte gehen ebenfalls nicht in die Analyse ein, da Mauern zur Begrenzung von Grundstücken keinen Bestandteil der ALKIS-Daten darstellen. Die Berechnung der Distanzen zwischen ALKIS und Referenztestfeld liefert 1934 Punkte innerhalb von Gebäudepolygonen. 75% davon haben einen Abstand von bis zu 20 cm zum Polygon, nur 25% haben einen größeren Abstand. Zu diesen gehören vor allem Punkte, die z. B. an zurückgesetzten Gebäude-Elementen auftreten (Abb. 4.3 b), die in ALKIS nicht digitalisiert wurden.

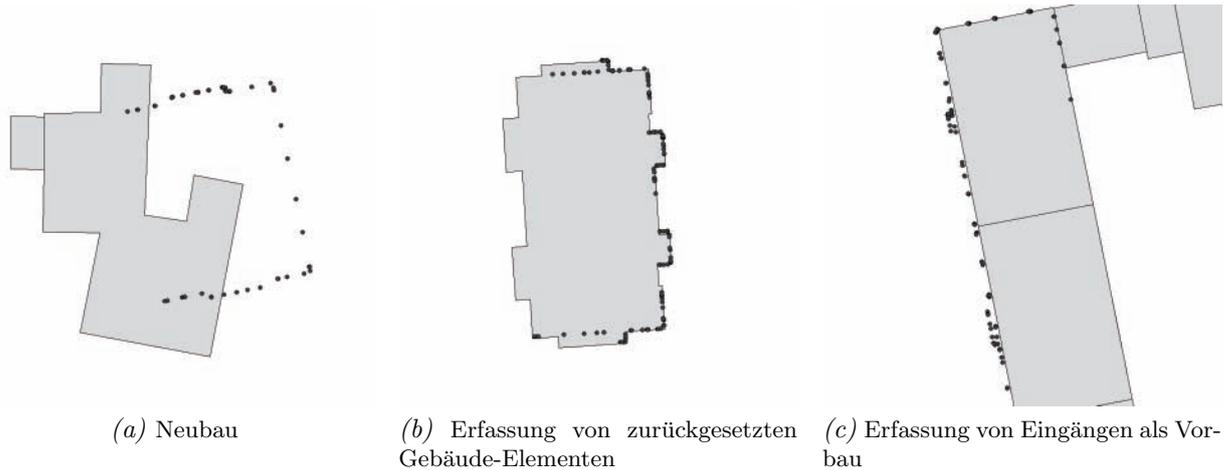


Abbildung 4.3.: Gebäudepolygone (graue Flächen) aus ALKIS im Vergleich zu Punkten des hochgenauen Testfelds.

Die übrigen 2084 Punkte liegen außerhalb der Gebäudepolygone. Davon haben 1982 Punkte einen maximalen Abstand bis zu 70 cm zu den ALKIS-Gebäuden, der mittlere Abstand dieser Punkte beträgt 18,83 cm (Median der Distanzen: 18,03 cm). Da Mittelwert und Median nahezu gleich sind, werden keine groben Ausreißer in den Daten vermutet. Größere Distanzen außerhalb der Polygone treten z. B. an Türen oder Vorbauten der Fassaden auf, da diese Elemente nicht digitalisiert vorliegen, bei der terrestrischen Vermessung jedoch detailliert erfasst wurden. Abb. 4.3 (c) zeigt Beispiele an zwei Gebäuden, jeweils etwa mittig an der lange Seite der Gebäudepolygone. Nur 18% der Punkte außerhalb weisen eine Distanz von mehr als 30 cm, und nur 5% der Punkte mehr als 70 cm, zum nächstgelegenen Gebäudepolygon auf. Insgesamt 1701 Punkte (82% der Punkte außerhalb von Polygonen) liegen maximal 30 cm von einem Polygon entfernt. Ein Histogramm der Distanzen zwischen den Referenzdaten und den Gebäudepolygonen aus ALKIS zeigt Abb. 4.4.

Analyse der amtlichen Geodaten mit Punktwolken

Zusätzlich zu den durchgeführten Experimenten mit den tachymetrisch erfassten Referenzdaten wurden ausgewählte amtliche Geodaten mit Punktwolken verglichen. Einschränkend gilt, dass die Genauigkeit der Punktwolken in einem übergeordneten Koordinatensystem nicht bekannt ist, aber in der Größenordnung der GNSS-Genauigkeit angenommen werden kann. Die Scanner des VMX-250 haben eine Genauigkeit von 10 mm (Riegl LMS GmbH, 2010) und die Trajektorie zur Erfassung der Punktwolken wird mit den INS-Daten gefiltert, daher kann lokal eine gute Genauigkeit für die Punktwolken erwartet werden. Aus diesen Annahmen gilt, dass die Mobile Mapping Punktwolken benachbarter Fassaden entweder vor oder hinter den Daten aus ALKIS liegen sollten oder bei Betrachtung von Gebäuden auf gegenüberliegenden Straßenseiten jeweils einmal vor und einmal

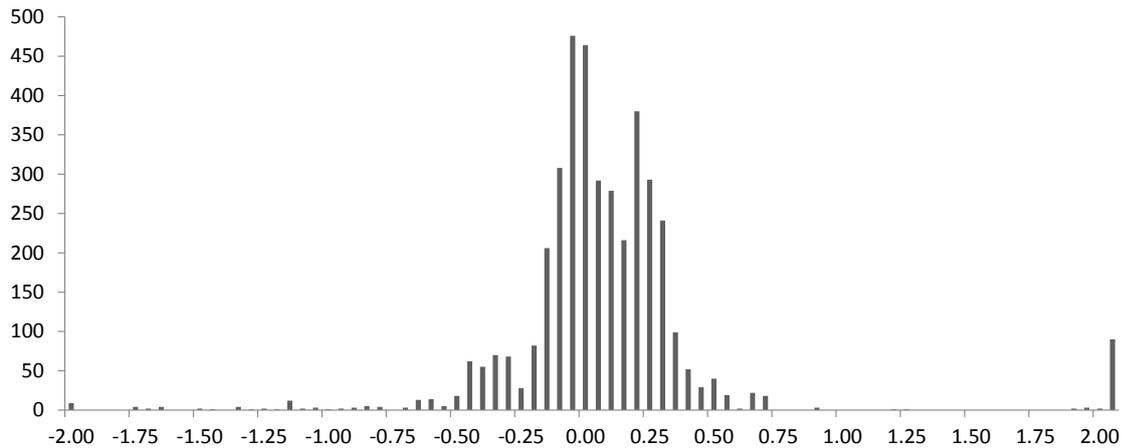


Abbildung 4.4.: Histogramm der Distanzen zwischen Referenzdaten und ALKIS.

hinter der Fassade, wie in Abb. 4.5 (a) schematisch dargestellt. Problematisch sind die Fälle in Abb. 4.5 (b), wenn die Gebäudepolygone benachbarter Fassaden einmal vor und einmal hinter der Punktwolke liegen und Abb. 4.5 (c), wenn die Punktwolken gegenüberliegender Fassaden vor den korrespondierenden Polygonen liegen.

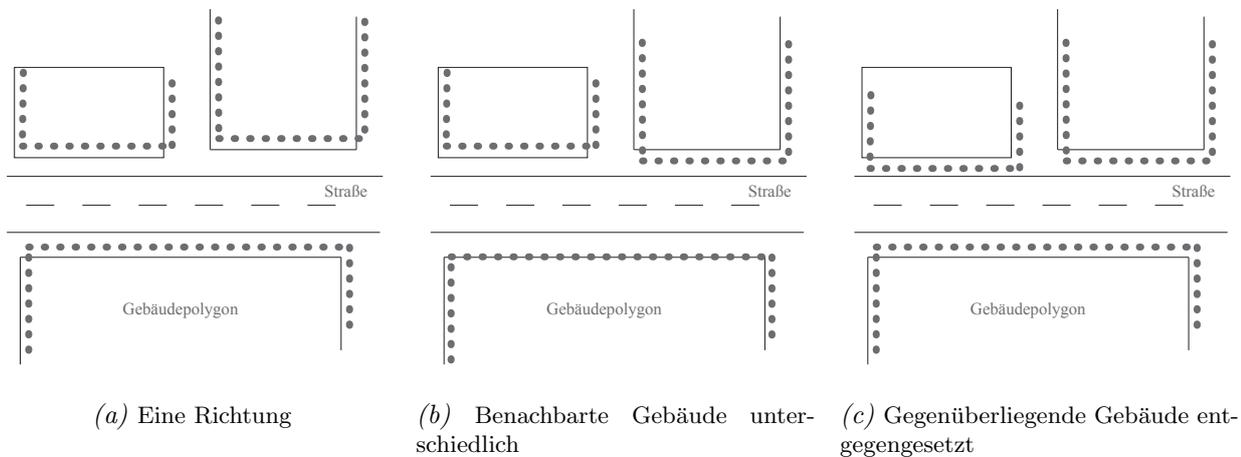


Abbildung 4.5.: Schematischer Vergleich der Verschiebung zwischen Gebäudepolygonen (schwarze Linien) und Punktwolke (graue Punkte).

Für die quantitative Analyse wurden Gebäudepolygone aus ALKIS mit den Punktwolken eines Mobile Mapping Systems *RIEGL VMX-250* verglichen. Die Grundrisse der ALKIS-Daten wurden in Segmente zerlegt und für jedes dieser Segmente eine vertikale Ebene extrapoliert (Curs u. a., 2013). Jedes Segment wird durch zwei Punkte und eine Richtung beschrieben, die Endpunkte erhalten als zusätzliche Höhe die näherungsweise bekannte Höhe der Straße. Senkrecht über diesen Punkten werden zwei weitere Punkte mit einer wählbaren Höhe erzeugt, und definieren gemeinsam mit den Bodenpunkten eine Ebene. Für den Vergleich mit Mobile Mapping Punktwolken wurden die Segmente parallel zur Straße genutzt, alle anderen Segmente wurden aus den Daten entfernt. Abb. 4.6 (a) zeigt eine Übersicht über das ausgewertete Gebiet mit den Fassaden als blauen Flächen und der Trajektorie zur Aufnahme der Punktwolken als grauer Linie. Für alle Segmente wurde eine einheitliche Grundhöhe von 105 m (ellipsoidische Höhe) gewählt, die mittlere Gebäudehöhe wur-

den mit 5 m festgelegt. Diese Vereinfachung ist jedoch nur in ebenen Umgebungen ohne Steigung möglich, wenn eine weitgehend homogene Bebauung vorliegt. Die gewählte Gebäudehöhe bietet für das Testgebiet einen guten Kompromiss zwischen Einfamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern in Blockbebauung (b), da die Ebenen etwa der Größe der Fassaden von Einfamilienhäusern entsprechen und einen ausreichend großen Teil der Fassaden der Mehrfamilienhäuser abdecken. Die Daten wurden anschließend manuell bereinigt, um potentielle Fehlerquellen aufgrund unterschiedliche Aktualität oder komplexer Gebäudegrundrisse zu eliminieren. Im ausgewählten Gebiet wurden mit diesem Verfahren 950 vertikale Ebenen aus Grundrissen erzeugt, die das Gebiet bis auf wenige Lücken vollständig abdecken.

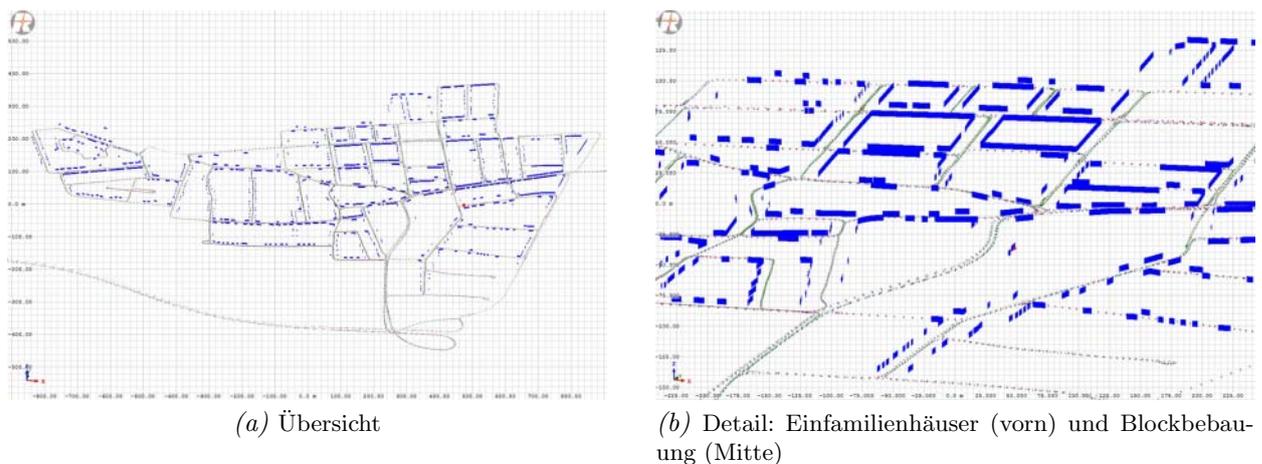
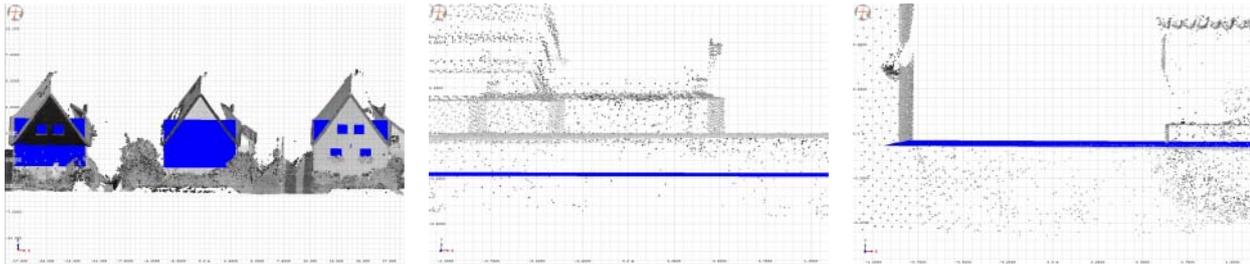


Abbildung 4.6.: Als Ebenen extrapolierte Fassaden aus ALKIS-Grundrissen, für ein Gebiet mit einer Ausdehnung von 1,6 km in Ost-West- und 0,7 km in Nord-Süd-Richtung (Screenshot RiPROCESS).

Der Vergleich zwischen ALKIS-Gebäuden und Punktwolken erfolgte in der Software RiPROCESS (Riegl LMS GmbH, 2011). Zu den extrapolierten Ebenen aus Grundrissen werden in der Software automatisch Ebenen in den Punktwolken geschätzt und korrespondierende Objekte zugeordnet. Die Zuordnung kann anschließend zur Verbesserung der Punktwolke auf Basis der Referenzdaten in einer Ausgleichung genutzt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch nur eine Analyse der Residuen zwischen ALKIS-Daten und Punktwolke durchgeführt. Die Normalenvektoren der Fassade zeigen für alle Ebenen vom Objekt weg nach außen, das Vorzeichen der Residuen liefert damit die Information, ob die Punktwolke vor (positiv) oder hinter (negativ) den ALKIS-Daten liegt. Insgesamt wurden rund 320 ALKIS-Gebäuden Ebenen aus der Punktwolke zugeordnet. Da die Schätzung der Ebenen in den Punktwolken getrennt nach Scanner erfolgt, gibt es pro Gebäude in der Regel zwei Zuordnungen. Die Residuen liegen zwischen $-0,34\text{ m}$ und $0,36\text{ m}$, mit einem Maximum bei $0,1\text{ m}$ und einem zweiten lokalen Maximum bei $-0,15\text{ m}$.

Diese Residuen können nicht mit einer globalen Verschiebung der Punktwolke begründet werden, da die Abweichung der Referenzebenen zu erfassten Fassaden aus Punktwolken keine Systematik aufweist. So liegen die Referenzebenen bei benachbarten Häusern auf derselben Straßenseite sowohl vor als auch hinter der Fassade oder bei Gebäuden auf gegenüberliegenden Straßenseiten jeweils hinter der Fassade. Abb. 4.7 (a) zeigt den Fall für dieselbe Straßenseite, wobei in Abb. 4.7 (b) die Referenzebene vor der Fassade der Punktwolke und in Abb. 4.7 (c) die Referenzebene näherungsweise identisch ist mit der Punktwolke. Bei einem Versatz der Daten aufgrund der GNSS-Ungenauigkeit

wäre eine konsistente Verschiebung bei direkt benachbarten Häusern innerhalb einer Straße zu erwarten. Die Ergebnisse der Untersuchung deuten darauf hin, dass die Genauigkeit der Daten in der gleichen Größenordnung liegt, wie die Lagegenauigkeit der Punktwolken aus Mobile Mapping. Eine übergeordnete Untersuchung der Genauigkeit der Punktwolken auf Basis der ALKIS-Grundrisse ist daher nicht möglich. Für eine Analyse der Korrektheit segmentierter Objekte muss die Aktualität der Vergleichsdaten berücksichtigt werden.



(a) Frontansicht: Extrapolierte Ebenen vor (links und Mitte) und hinter (rechts) der Punktwolke
 (b) Aufsicht mittleres Gebäude aus (a): Ebene 25 cm vor der Fassade der Punktwolke
 (c) Aufsicht rechtes Gebäude aus (a): Ebene minimal hinter der Fassade

Abbildung 4.7.: Vergleich der extrapolierten Referenzebenen aus den ALKIS-Grundrissen (blau) mit Fassaden der Punktwolken (graue Punkte). Beispiel einer Straße im Testgebiet.

4.4. Positionierung von Fahrzeugen mittels Landmarken-Karten

Ein Szenario zur Nutzung hochgenauer Karten sind Landmarken-Karten zur Positionierung autonomer Fahrzeuge. Das Potential einer Karte aus LiDAR Mobile Mapping Punktwolken zur Positionierung mittels Stereokamera wird in einer Simulation untersucht (Hofmann u. a., 2011). Eine vergleichbare Simulation führte Brenner (2009) für die erreichbare Positionierungsgenauigkeit eines Fahrzeugs bei Verwendung eines Laserscanners durch. Diese Analyse zeigt die sensorabhängige Genauigkeit der Positionierung für verschiedene inner- und außerstädtische Bereiche auf Basis der Landmarken-Karte.

Die für die Simulation verwendete Karte enthält ausschließlich vertikale zylindrische Objekte, wie Masten der Straßenbeleuchtung und Ampeln, Stangen von Verkehrszeichen oder Baumstämme, die automatisiert aus Punktwolken segmentiert wurden. An diskreten Positionen werden alle von dort sichtbaren Objekte aus der Karte ermittelt und die Position und Orientierung des Fahrzeugs anhand dieser Landmarken in einer Ausgleichung berechnet. Den funktionalen Zusammenhang zwischen den Beobachtungen der Landmarken in den Bildern und den Kartenobjekten beschreiben die Kollinearitätsgleichungen. Mögliche Verdeckungen durch andere Verkehrsteilnehmer werden nicht berücksichtigt. Die Positionierungsgenauigkeit wird für Einzelpositionen auf Basis der Landmarken sowie mit Kalman-Filter (Kalman, 1960) unter Verwendung der Odometrie untersucht. Die Filterung dient der Überbrückung von Strecken ohne Landmarken.

Landmarken-Karte

Die Simulation wurde für eine 21,7 km lange Strecke in Hannover durchgeführt (Abb. 4.8). Die Punktwolke zur Erstellung der Karte wurde mit dem Mobile Mapping System Streetmapper (Kre-

mer und Hunter, 2007) entlang der Route (rote Linie) erfasst und enthält 70,7 Mio. Punkte, im Durchschnitt 3200 Punkte pro Meter auf der Trajektorie. Für die Landmarken-Karte wurden rund 2600 Zylinder (grüne Punkte) voll-automatisch aus der Punktwolke segmentiert (Brenner, 2009). Die Objekte sind nicht gleichmäßig entlang der Trajektorie verteilt, an Kreuzungen finden sich gehäuft zylindrische Objekte, entlang von Umgehungsstraßen sind nur sehr wenige Objekte vorhanden. Die Genauigkeit der Position der Kartenobjekte wurde exemplarisch an einer Kreuzung mittels Tachymeter überprüft (Brenner und Hofmann, 2010).

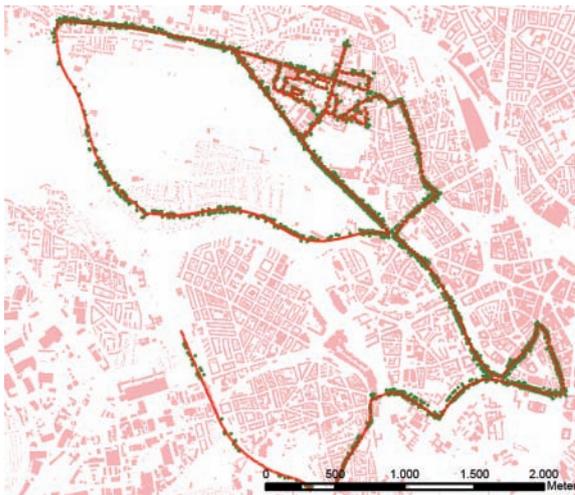


Abbildung 4.8.: Verteilung von zylindrischen Landmarken entlang der untersuchten Trajektorie, Hofmann u. a. (2011).

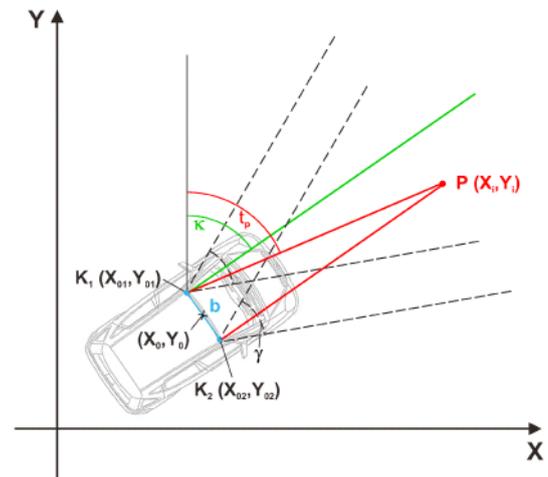


Abbildung 4.9.: Sichtbarkeitsanalyse für Objekte in einem Stereokamerasystem mit Basis b , Hofmann u. a. (2011).

Ermittlung der sichtbaren Landmarken

Entlang der Trajektorie wurden 2100 Positionen im Abstand von 10 m für die Simulation ausgewählt, sodass für jede Position Koordinaten und Orientierungswinkel des Fahrzeugs aus der Datenaufnahme vorliegen. Die Orientierung des Fahrzeugs ist erforderlich, da die simulierten Sensoren keine 360°-Abdeckung der Fahrzeugumgebung bieten. Auf Basis dieser Posen werden die sichtbaren Objekte aus der Karte ermittelt. Ein Objekt wird als sichtbar angenommen, wenn das Objekt im Überlappungsbereich des Sichtfeldes der beiden Kameras erfasst werden kann und seine Größe im Bild nicht unter dem festgelegten Minimum von n_{px} liegt. Die Größe eines Objekts im Bild ist von der Distanz zwischen Kamera und Objekt, der Brennweite des Objektivs c , der Größe der Pixel des Sensor d_{px} und der Objektgröße d_{Obj} abhängig. Die maximale Distanz s_{max} berechnet sich nach:

$$s_{max} = \frac{c \cdot d_{Obj}}{n_{px} \cdot d_{px}}. \quad (4.2)$$

Bei den angenommenen Werten $c = 0,006$ m, $d_{px} = 5,5 \mu\text{m}$ und $d_{Obj} = 0,3$ m und einer minimalen Objektgröße im Bild von $n_{px} = 7$ Px, können Objekte bis zu einer Distanz von 50 m detektiert werden. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Objekte im Überlappungsbereich der Sichtfelder der Kameras liegen, um eine Stereoauswertung zu ermöglichen. Der Überlappungsbe-

reich ist abhängig vom Öffnungswinkel γ , von der Position $K(X_{0k}, Y_{0k})$ mit Nummer der Kamera $k = 1, 2$ und der Orientierung κ der Kameras:

$$\begin{bmatrix} X_{0k} \\ Y_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \pm \frac{b}{2} \cdot \cos \kappa \\ Y_0 \pm \frac{b}{2} \cdot \sin \kappa \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

wobei X_0, Y_0 die in der Simulation als bekannt vorausgesetzten Koordinaten des Mittelpunktes der Basis und b die Länge der Basis zwischen den Kameras angeben. Vereinfacht wird angenommen, dass die Kameras parallel ausgerichtet sind und die gleiche Orientierung aufweisen. Aus der berechneten Kameraposition und den Koordinaten der Objekte muss für jedes Objekt die Richtung t_p zu den beiden Projektionszentren bestimmt werden. Ein Objekt ist sichtbar, wenn die Bedingung

$$|\kappa - t_p| \leq \frac{\gamma}{2} \quad (4.4)$$

erfüllt ist. Abb. 4.9 zeigt die Situation für einen Objektpunkt $P(X_i, Y_i)$.

Analyse der Genauigkeit

Die Analyse der Genauigkeit für Position und Richtungswinkel des Fahrzeugs wurde mittels Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt. Da die Berechnung im 2D-Raum erfolgt, genügen zwei Objekte für die Ausgleichung. Das funktionale Modell basiert auf der Kollinearitätsgleichung, welche im zweidimensionalen Fall vereinfacht werden kann zu

$$x'_i = c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X_i - X_0) + r_{21} \cdot (Y_i - Y_0)}{r_{12} \cdot (X_i - X_0) + r_{22} \cdot (Y_i - Y_0)}, \quad (4.5)$$

mit den Bildkoordinaten der Objekte x'_i , den zugehörigen Objektkoordinaten $P(X_i, Y_i)$ sowie den Elementen der Rotationsmatrix r_{ij} . Unter Berücksichtigung von Gl. (4.3), die die Verschiebung der Projektionszentren der Kameras um $\pm b/2$ berücksichtigt, ergeben sich die Beobachtungsgleichungen für Kamera $k = 1, 2$ aus Gl. (4.5) zu:

$$x'_{i,k} + v_{x'_{i,k}} = c \cdot \frac{\cos \kappa \cdot (X_i - X_0) + \sin \kappa \cdot (Y_i - Y_0) \pm \frac{b}{2}}{-\sin \kappa \cdot (X_i - X_0) + \cos \kappa \cdot (Y_i - Y_0)}. \quad (4.6)$$

Das stochastische Modell führt die Genauigkeiten der Beobachtungen in die Ausgleichung ein. In der Simulation gehen die Koordinaten der Kartenobjekte mit einer Standardabweichung von 0,1 m und die Bildkoordinaten der sichtbaren Objekte mit einer Standardabweichung von 1/3 Pixel als unkorrelierte Beobachtungen in die Ausgleichung ein. Alle weiteren Annahmen, wie die Länge der Basis sowie die Brennweite der Kamera, werden fehlerfrei in das Modell eingeführt. Als Ergebnis enthält die Kofaktormatrix der Parameter der Positionierung \mathbf{Q}_{xx} die stochastische Information der Fahrzeugposition:

$$\mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}, \quad (4.7)$$

wobei die Designmatrix \mathbf{A} die Informationen über die Position und Orientierung des Fahrzeugs und die Anzahl und Verteilung der Referenzobjekte aus der Karte enthält, \mathbf{P} liefert die Gewichte.

Ergebnisse für Einzelpositionen

Der Einfluss von Anzahl und Verteilung der sichtbaren Landmarken auf die Positionierungsgenauigkeit eines Fahrzeugs wird im folgenden Abschnitt für eine Stereokamera mit einer Basis von 0,25 m und einem Öffnungswinkel zwischen 50° und 100° analysiert. Dies simuliert eine Stereokamera im Innenspiegel eines Fahrzeugs. Eine Positionierung des Fahrzeugs ist für den simulierten 2D-Fall mit mindestens zwei sichtbaren Landmarken möglich. Für einen Öffnungswinkel von 100° und einer Basis von 0,25 m wurden Genauigkeiten zwischen 0,41 m (bei drei sichtbaren Landmarken) und 0,12 m (bei mehr als sechs sichtbaren Landmarken) erreicht. Neben der Anzahl der sichtbaren Landmarken hat die geometrische Verteilung der Objekte entlang der Trajektorie Einfluss auf die Qualität der Positionierung. Gleichmäßig verteilte Landmarken liefern aufgrund des Kameramodells eine höhere Positionierungsgenauigkeit quer zur Fahrtrichtung. Ungünstig verteilte Objekte, z. B. nur auf einer Seite der Straße, verzerrten dieses Ergebnis. Der Einfluss der Geometrie der Landmarken auf die Positionierungsgenauigkeit entlang der Trajektorie bei einem Vergleich von Umgehungsstraße (Nord-Süd-Verlauf) und Allee (Ost-West-Verlauf) für Öffnungswinkel von 60° und 100° ist in Abb. 4.10 mit Fahrtrichtung von Süden nach Norden dargestellt. Die Fehlerellipsen zeigen die Standardabweichung der Positionierung sowie die Orientierung. Die Ergebnisse der Simulation sind abhängig von der Fahrtrichtung, da die Stereokamera nur den Bereich vor dem simulierten Fahrzeug beobachtet.



Abbildung 4.10.: Darstellung der Fehlerellipsen für simulierte Positionierung mit variablem Öffnungswinkel bei einer Basis von 0,25 m. Öffnungswinkel 60° (orange) und 100° (grün), Ellipsen skaliert mit Faktor 20, nach Hofmann u. a. (2011).

Abb. 4.11 zeigt die Standardabweichung der Positionierung mit einer Farbskala entlang der Trajektorie. Grün zeigt eine hohe Positionierungsgenauigkeit im Bereich weniger Zentimeter, rot zeigt eine Positionierungsgenauigkeit schlechter als 1,51 m bis 8,50 m im ungünstigsten Fall. Gebiete für die keine Position bestimmt werden konnte, da weniger als zwei Landmarken sichtbar waren, sind blau gekennzeichnet. In Abb. 4.11 (a) ist links eine Umgehungsstraße ohne Bebauung mit wenigen Landmarken zu sehen. Da die Positionsbestimmung ausschließlich auf Basis von Landmarken erfolgte, kann über große Strecken keine Position berechnet werden. Abb. 4.11 (b) zeigt zum Ver-

gleich ein innerstädtisches Gebiet mit vielen Landmarken. In diesem Fall ist nur für kurze Strecken keine Positionsbestimmung möglich.

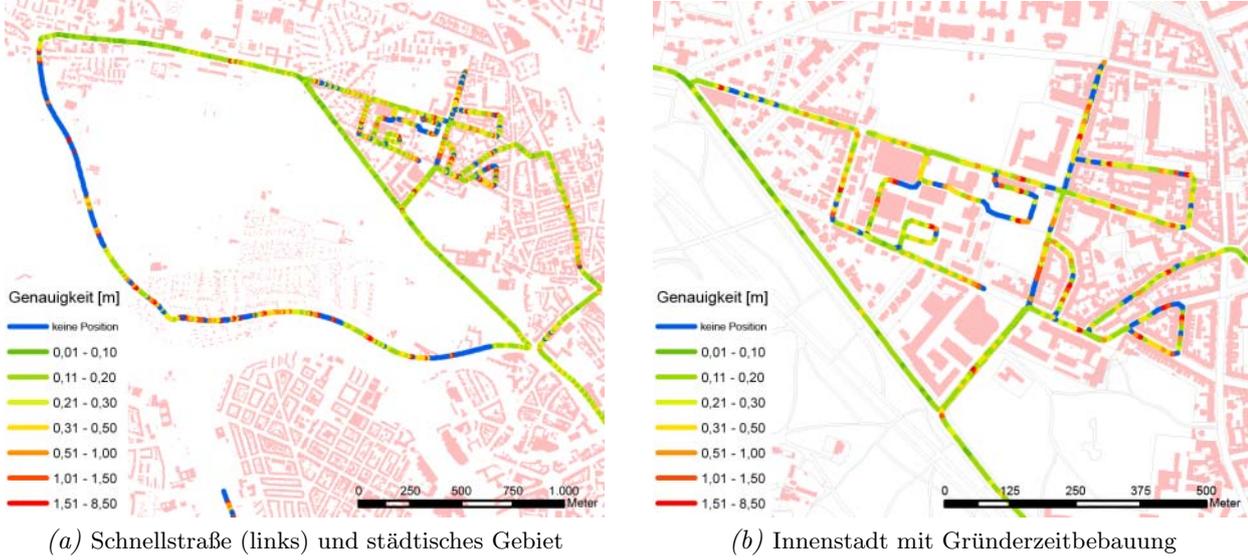


Abbildung 4.11.: Farbcodierte Darstellung zur Visualisierung der erreichbaren Positionierungsgenauigkeit auf Basis der genutzten Landmarken entlang der erfassten Trajektorie, nach Hofmann u. a. (2011).

Stützung der Positionsbestimmung mittels eines Kalman-Filters

Im bisher beschriebenen Szenario wird jede Position separat ohne Kenntnis der vorherigen Positionen ausgewertet. Liegen Odometriedaten des Fahrzeugs vor, können die Positionen entlang der Trajektorie gefiltert werden. In der Simulation wurden zwei Inertialnavigationssysteme (INS) mit unterschiedlicher Qualität definiert, um den Einfluss zu untersuchen. Die Filterung der Positionen basiert auf einem Kalman-Filter mit einem vereinfachten Bewegungsmodell des Fahrzeugs:

$$\begin{aligned}
 x_i &= x_{i-1} + dt \cdot v_{i-1} \cdot \sin \kappa_{i-1} \\
 y_i &= y_{i-1} + dt \cdot v_{i-1} \cdot \cos \kappa_{i-1} \\
 v_i &= v_{i-1} \\
 \kappa_i &= \kappa_{i-1},
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

mit dem Zeitschritt dt zwischen einem Zeitpunkt i und dem vorhergehenden Zeitpunkt $i - 1$ und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs v_i . Die Übergangsmatrix Φ des Filters ergibt sich dann zu

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt \cdot \sin \kappa_{i-1} & 0 \\ 0 & 1 & dt \cdot \cos \kappa_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{4.9}$$

Die Genauigkeitsanalyse erfolgt über die Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{xx} der Parameter der Position zum Zeitpunkt i :

$$\mathbf{Q}_{xx_i}^+ = \mathbf{Q}_{xx_i}^- - \mathbf{K} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{Q}_{xx_i}^-, \tag{4.10}$$

wobei „-“ die Prädiktion und „+“ den Update-Schritt des Filters enthält mit

$$\begin{aligned}\mathbf{Q}_{xx_i}^- &= \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{Q}_{xx_{i-1}}^+ \cdot \mathbf{\Phi}^T + \mathbf{Q}_{ww} \\ \mathbf{K} &= \mathbf{Q}_{xx_i}^- \cdot \mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{Q}_{ll} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{Q}_{xx_i}^- \cdot \mathbf{A}^T)^{-1},\end{aligned}\tag{4.11}$$

mit Kalmangain \mathbf{K} , Designmatrix \mathbf{A} der Beobachtungen, Varianzen der Messungen \mathbf{Q}_{ll} sowie Systemrauschen \mathbf{Q}_{ww} . Die Landmarken werden in der Filterung nur genutzt, wenn die Positionierungsgenauigkeit bei ausschließlicher Nutzung der Landmarken besser als 0,2 m ist, ansonsten erfolgt die Positionsbestimmung ausschließlich mittels der INS-Informationen.

Ergebnisse mit Filterung

Für die Simulation mit Filterung wurden ein hochgenaues INS sowie ein serienfähiges INS aus dem Automobil-Bereich angenommen. Die Charakteristika der INS sind durch die Standardabweichungen von Geschwindigkeit σ_v , Orientierungswinkel σ_φ und Winkelgeschwindigkeit $\sigma_{\varphi'}$ definiert und wurden für das hochgenaue INS mit $\sigma_v = 0,02$ m/s, $\sigma_\varphi = 0,01^\circ$ und $\sigma_{\varphi'} = 0,001^\circ/\text{s}$ und für das serienfähige INS mit $\sigma_v = 0,1$ m/s, $\sigma_\varphi = 0,1^\circ$ und $\sigma_{\varphi'} = 0,005^\circ/\text{s}$ festgelegt.

Bei Verwendung eines hochgenauen INS mit Kalman-Filter konnten nur für 0,2% der 2100 Trajektorienpunkte keine Position berechnet werden, was die Fehlerrate gegenüber Einzelpositionen um zwei Größenordnungen reduziert. Als Kriterium für eine nicht erfolgte Positionsbestimmung wurde eine Positionierungsgenauigkeit von schlechter als 20 m definiert. Zusätzlich konnte die ermittelte Genauigkeit für die Positionen entlang der Trajektorie gegenüber Einzelpositionen erhöht werden und liegt für die untersuchten Gebiete bei einer Standardabweichung von besser als 0,30 m (1σ). Ein serienfähiges INS führt ebenfalls zu Verbesserungen der Positionierungsgenauigkeit, Abschnitte ohne Landmarken können mit Hilfe des Filters überbrückt werden. Die Standardabweichung der Positionierung mit serienfähigem INS liegt bei längeren Strecken ohne Landmarken allerdings bei unter 0,50 m. Für beide Filter wurde zudem die maximale Distanz berechnet, die ein Fahrzeug ohne Landmarken mit einer definierten maximalen Positionierungsgenauigkeit, zurücklegen kann. Die angenommene Positionierungsgenauigkeit zu Beginn der Filterung beträgt 0,1 m, die Ergebnisse wurden für ein Stereokamerasystem mit 0,25 m Basis und 100° Öffnungswinkel berechnet. Bei einer Positionierungsgenauigkeit (1σ) von maximal 0,2 m (0,3 m) kann ein hochgenaues INS 650 m (950 m) ohne Landmarken zurücklegen, ein serienfähiges INS benötigt für diese Genauigkeitsanforderungen nach 30 m (80 m) die Stützung durch Landmarken.

Die Ergebnisse der Simulation für Einzelpositionen sowie mit Filterung der Positionen unter Verwendung eines hochgenauen INS sind in Abb. 4.12 an zwei Beispielen dargestellt. Abb. 4.12 (a) zeigt den Übergang von einer Bundesstraße außerhalb der Stadt mit wenigen Landmarken zu einer Allee in bebautem Gebiet mit vielen Landmarken. Zur Orientierung im Bild dienen Straßenflächen (graue Linien) und Gebäudegrundrisse (rote Flächen), die Landmarken der Karte sind als grüne Punkte dargestellt. Grüne Ellipsen zeigen die Positionierungsgenauigkeit entlang der Trajektorie für Einzelpositionen auf Basis der sichtbaren Landmarken, blaue Ellipsen zeigen die Situation mit einer zusätzlichen Filterung der Position unter Verwendung der vorherigen Fahrzeugpositionen. Die Darstellung ist nur in der Fahrtrichtung von Süden nach Norden, nach der Rechtskurve Richtung Osten gültig, da die simulierten Sensoren nur den vorderen Teil des Fahrzeugs erfassen. Entlang der Bundesstraße im linken unteren Teil der Abbildung ist die Positionierungsgenauigkeit für ein-

zelne Positionen auf Basis der Landmarken gering (grüne Ellipsen mit großen Halbachsen, große Änderungen der Orientierung). Eine Verbesserung der Genauigkeit wird im Kreuzungsbereich links oben und in der angrenzenden Allee erreicht, da dort genügend Landmarken mit guter Geometrie vorhanden sind. Für die Berechnung der Position mit Filterung (blaue Ellipsen) ist die Genauigkeit über die gesamte Strecke höher. Der Abschnitt links ohne Landmarken wurde durch die Filterung mit zusätzlicher INS-Information überbrückt. Im Vergleich zeigt sich, dass die Positionen entlang der Umgehungsstraße in diesem Fall vor allem durch die INS-Daten bestimmt wird. Im Kreuzungsbereich ist auch für diese Berechnung eine Verbesserung der Genauigkeit durch die zusätzlichen Landmarken erkennbar, grüne und blaue Ellipsen fallen hier zusammen.

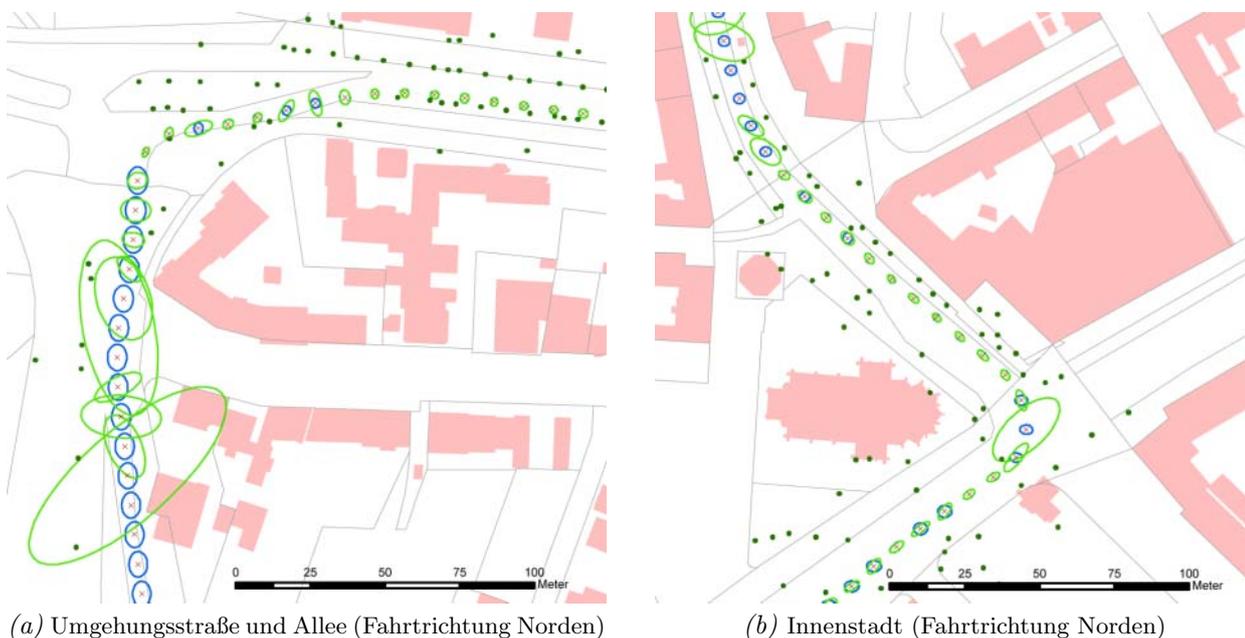


Abbildung 4.12.: Positionierungsgenauigkeit für die Simulation: Einzelpositionen (grün), mit Filter (blau), georeferenzierte Stangen als Landmarken (grüne Punkte). Alle Ellipsen mit Faktor 20 vergrößert, blaue Ellipsen teilweise durch grüne überlagert, nach Hofmann u. a. (2011).

Abb. 4.12 (b) zeigt einen Ausschnitt der Trajektorie im Stadtgebiet mit Fahrtrichtung Nord-Ost und nach der Linkskurve Richtung Nord-West. Die simulierte Positionierungsgenauigkeit für Einzelpositionen (grüne Ellipsen) ist nur an zwei Positionen schlechter als 1 m und wird in diesen Fällen nicht dargestellt (linke, obere Ecke). Bei ungünstiger Verteilung der Landmarken liegt die Positionierungsgenauigkeit unter der Standardabweichung mit Filterung (blaue Ellipsen), die für den gesamten Abschnitt mit einer hohen Qualität berechnet werden kann. Im mittleren Bereich ist die Standardabweichung für beide Berechnungsmethoden identisch und führt zu einer Überlagerung der Ellipsen, in der Abbildung sind in diesem Fall nur grüne Ellipsen sichtbar.

4.5. Diskussion

Dieses Kapitel zeigt verschiedene Geodaten als Grundlage zur Analyse und Verbesserung von Mobile Mapping Punktwolken. Die vorgestellten ALKIS-Daten, z. B. Gebäudepolygone, haben den Vorteil, dass sie in Deutschland flächendeckend vorliegen. Zusätzlich wurde die Erfassung eines

hochgenauen Testfelds mit vorhandenen Objekten ohne zusätzliche Signalisierung als Referenz vorgestellt. Der Vorteil dieser Daten liegt in der hohen Genauigkeit der Daten. Nachteil ist der hohe Aufwand zur Bereitstellung der Daten, der keine wirtschaftlich sinnvolle Skalierung auf große Gebiete zulässt.

Die Analyse der amtlichen Geodaten auf Basis von geodätisch vermessenen hochgenauen Testfeldern zeigt die Einschränkungen als Referenz für Mobile Mapping Punktwolken, wenn sehr hohe Genauigkeitsanforderungen im Zentimeter- und Millimeterbereich gestellt werden. Als Referenz sollte die Genauigkeit der Daten eine Größenordnung besser sein als die Genauigkeit der analysierten Punktwolken, dieses Kriterium erfüllen die ausgewerteten amtlichen Daten nicht. Allerdings sind die Daten geeignet, um z. B. den Suchraum zur Segmentierung von Gebäuden aus Punktwolken einzuschränken (Eggert und Sester, 2013) und die Geschwindigkeit der eingesetzten Algorithmen zu erhöhen.

Das Potential einer Landmarken-Karte zur Positionierung von Fahrzeugen wurde in einer Simulation gezeigt. Mit einer Landmarken-Karte und der simulierten Stereokamera kann eine spurge-naue Positionierung im Bereich weniger Zentimeter bis Dezimeter erreicht werden. Dies stellt eine Verbesserung gegenüber rein GNSS-basierten Verfahren zur Positionierung dar. Untersuchungen mit einer solchen Karte und realen Punktwolken haben Schlichting und Brenner (2014b) und Schlichting und Brenner (2014a) zudem mit Laserscannern aus dem Automobil-Sektor durchgeführt. Die erreichten Genauigkeiten unter Verwendung von Zylindern und Ebenen liegen in der Größenordnung der Simulation für eine Stereokamera sowie in der von Brenner (2009) durchgeführten Simulation mit Laserscannern. Die Simulation zeigt auch den Einfluss der Landmarken auf die Positionierung aufgrund der geometrischen Verteilung der Landmarken und die Einschränkungen bei Verwendung eines einzigen Landmarken-Typs, in diesem Fall zylindrischen Objekten. Zudem beeinflusst die Genauigkeit der Kartenobjekte die Qualität der Positionierung mittels Landmarken. In der Simulation wurde für alle Kartenobjekte eine Genauigkeit von 10 cm für das gesamte Gebiet angenommen. Die Angabe wurde aus einer tachymetrischen Vermessung einer Kreuzung ermittelt und auf alle Objekte, ohne Berücksichtigung des Einflusses von GNSS-Effekten, übernommen. Für große Gebiete ist dieses Vorgehen nicht praktikabel, da die Genauigkeit der Punktwolken nicht konstant und der Aufwand einer tachymetrischen Erfassung sehr hoch ist. Es werden daher verschiedene Methoden untersucht, um die Genauigkeit der Punktwolken für große Gebiete zu analysieren.

5. Genauigkeitsanalyse von Mobile Mapping Punktwolken

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Ansätze zur Genauigkeitsanalyse von Mobile Mapping Punktwolken untersucht. Der erste Ansatz (Kapitel 5.1) nutzt unstrukturierte Punktwolken die in ein gleichmäßiges Raster (Kacheln) unterteilt werden. Mittels ICP-Algorithmus werden die Residuen zwischen den Punktwolken unterschiedlicher Epochen innerhalb der Kacheln ermittelt und zur Analyse der Genauigkeit genutzt. Künstliche Referenzobjekte werden nicht verwendet. Der zweite Ansatz (Kapitel 5.2) nutzt segmentierte Objekte, speziell Zylinder und Ebenen, zur Analyse der Genauigkeit der Punktwolken. Untersucht wird die Qualität der automatischen Segmentierung der Objekte sowie die Genauigkeit der Punktwolken. Die Segmentierung ausgewählter Objekte ermöglicht zudem einen Vergleich mit Objekten aus anderen Datenquellen, sodass eine externe Qualitätskontrolle möglich ist.

5.1. Punktwolkenbasierter Ansatz

Die Analyse der Genauigkeit erfolgt bei dieser Methode anhand der Ausgleichung von partitionierten 3D-Punktwolken mittels ICP-Algorithmus. Dieser nutzt flächenhafte, ebene oder stetig gekrümmte Objekte zur Auswertung. Die Genauigkeit der Punktwolken wird für jede Kachel aus der Translation zwischen Punktwolken unterschiedlicher Epochen ermittelt. Sie wird innerhalb einer Kachel als konstant angenommen, so dass eine starre Transformation der Punktwolken möglich ist. Das hat den Vorteil, dass der Einfluss lokaler Effekte der GNSS-Positionierung dargestellt werden können. Die Seitenlänge der Kacheln gibt die Auflösung der Ergebnisse vor. Daher sollte die Größe der Kacheln so klein wie möglich sein, um auch kleinräumige Effekte auf die Genauigkeit der Daten abzubilden. Ein weiterer Vorteil der Kacheln liegt darin, dass die Auswertung einfach parallelisierbar ist. Der folgende Abschnitt zur Erläuterung des gewählten Ansatzes gliedert sich in die Vorverarbeitung der Daten, die Beschreibung des genutzten ICP-Algorithmus und verschiedene Experimente zur Evaluation der Methode.

Vorverarbeitung der 3D-Punktwolken

Die Vorverarbeitung der unstrukturierten 3D-Punktwolken umfasst eine räumliche Partitionierung des Projektgebiets in Kacheln mit definierbarer Seitenlänge, eine temporale Segmentierung der Punkte innerhalb der Kacheln sowie die Berechnung eines Normalenvektors für jeden Punkt. Anschließend erfolgt die Auswahl geeigneter Objekte mittels Surface-Growing. Die Seitenlänge der Kacheln ist für das gesamte Projektgebiet konstant und wird abhängig von den Daten und der gewünschten Auflösung gewählt. Bei der Wahl der Seitenlänge sollte berücksichtigt werden, dass die Punktwolken innerhalb der Kacheln ausreichend viele Punkte für die Auswertung enthalten. Eine Abschätzung der Punktdichte in den Punktwolken findet sich in Kapitel 2.5. Die Ausgleichung der Punktwolken erfolgt auf Basis von stetigen Flächen. Kacheln können daher nur ausgewertet

werden, wenn ausreichend viele geeignete Objekte enthalten sind. Zu diesen gehören alle Objekte, deren Normalenvektoren für benachbarte Punkte nur eine geringe Streuung aufweisen. Diese Objekte sollten für alle drei Achsen vorhanden sein, um mittels ICP-Algorithmus die Verschiebung für alle drei Raumrichtungen zu bestimmen. Die Höhe wird in der Regel durch Straßenpunkte bestimmt, die Lage durch Fassaden, Mauern, Zäune oder Stämme größerer Bäume.

Die erzeugten Kacheln werden anhand der RunID (Kapitel 2.6) in verschiedene Epochen getrennt, anschließend wird in jeder Punktwolke für jeden Punkt ein Normalenvektor unter Verwendung der k nächsten Nachbarn berechnet (Kapitel 2.8). Die Verarbeitung der Punkte erfolgt in einem k -D-Baum, um eine effiziente Suche der nächsten Nachbarn zu erreichen. Mit Hilfe dieser Punktnormalen werden mittels Surface-Growing (Kapitel 2.8) geeignete Punkte in den Punktwolken ausgewählt. Dazu zählen alle Punkte auf Ebenen oder stetig gekrümmten Flächen, deren benachbarte Normalen keine Diskontinuitäten aufweisen und die ein definiertes Homogenitätskriterium erfüllen. Eliminiert werden dagegen alle Punkte, die keiner stetigen Oberfläche zugeordnet werden können, etwa Vegetation mit Baumkronen oder Büschen und Objekte in Bewegung, z. B. Fußgänger. Das Homogenitätskriterium ist mit $\angle(n_{saat}, n_{neu}) < \epsilon$ definiert, d. h. die Normale n_{neu} eines Punktes darf maximal um den Wert ϵ von der Normalen n_{saat} des nächstgelegenen Punktes der Saatregion verschieden sein. Geprüft werden Punkte, die maximal eine Distanz d von der Saatregion entfernt sind. Beträgt der Winkel zwischen den Normalen weniger als der definierte Schwellenwert ϵ , wird der Punkt zur Saatregion hinzugefügt. Existieren keine weiteren Punkte, die der Saatregion hinzugefügt werden können, wird die Region als geeignet akzeptiert, sofern sie mindestens N Punkte enthält. Die Angabe einer minimalen Punktzahl verhindert, dass sehr kleine Objekte akzeptiert werden, wie sie z. B. auf bewegten Objekten oder in Vegetation trotz starker Streuung der Punktnormalen entstehen können. Gibt es für einen gewählten Saatpunkt keine weiteren Kandidaten, erfolgt die zufällige Wahl eines neuen Saatpunktes, sodass im Idealfall alle Punkte einer Punktwolke in geeignete Regionen segmentiert werden können. Ein zusätzliches Abbruchkriterium beendet den Algorithmus, wenn innerhalb einer Punktwolke in Folge eine definierte Anzahl Regionen (F) aufgrund einer zu geringen Punktzahl abgelehnt wurden. Punkte die keiner Region zugeordnet wurden, werden eliminiert. Das gewählte Homogenitätskriterium erlaubt gekrümmte Flächen, etwa auf Säulen und Masten. Daher erfolgt während und nach der Ausführung des Surface-Growing keine Schätzung der Ebenenparameter für die Regionen.

Das Ergebnis der Vorverarbeitung ist eine gefilterte Punktwolke, in der jeder Punkt Koordinaten, Zeitstempel, Normalenvektor und eine eindeutige Regionen-Nummer enthält. Die Regionen-Nummer wird im folgenden ICP-Algorithmus nicht für die Zuordnung genutzt, da korrespondierende Objekte in verschiedenen Epochen nicht zwingend zu übereinstimmenden Oberflächen zusammengefasst werden. Abb. 5.1 zeigt eine Punktwolke im Original (*a*) und nach der Filterung mittels Surface-Growing (*b*). Die Baumkrone im rechten oberen Teil der Kachel in (*a*) wird mit dem beschriebenen Ansatz eliminiert, der Stamm und größere Äste bleiben erhalten. Warnbaken und Absperrungen an Baustellen (Abb. 5.1, links und rechts unten) bleiben ebenfalls erhalten, wenn die Regionen ausreichend groß sind. Im Beispiel wurden alle Regionen entfernt, die weniger als 500 Punkte enthalten. Diese Regionen sind entweder sehr klein oder haben eine geringe Punktdichte, weil sie weit vom Fahrzeug entfernt liegen.

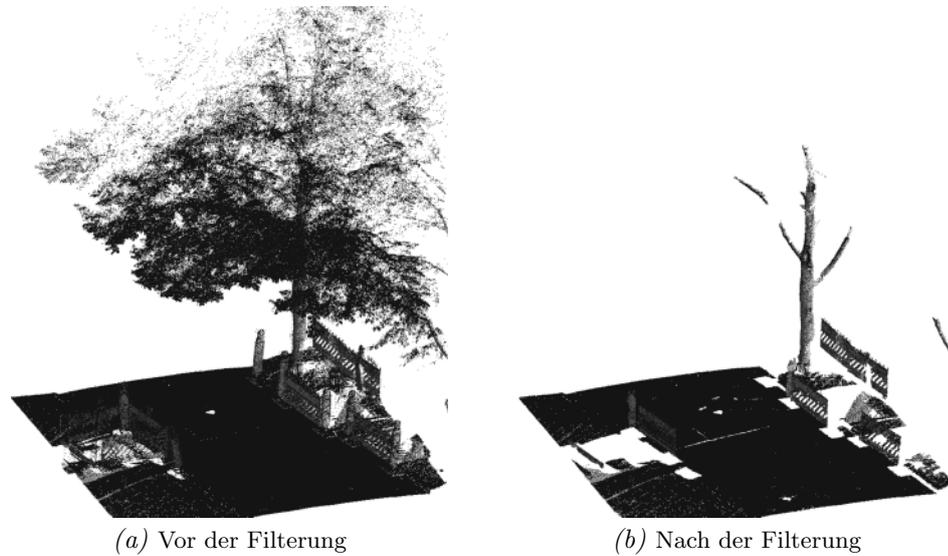


Abbildung 5.1.: Anwendung eines Surface-Growing-Algorithmus zur Filterung von geeigneten Punkten für den ICP-Algorithmus: Eine Kachel mit der Punktwolke aus einer Epoche. Objekte mit geringer Homogenität der Normalenvektoren werden eliminiert.

Ausgleichung der Punktwolken in Kacheln

Die Ausgleichung der gefilterten Punktwolken in den Kacheln erfolgt mit dem in Kapitel 2.7 beschriebenen adaptierten ICP-Algorithmus. Die Punktdichte der Punktwolken sowie der erfasste Bereich müssen nicht identisch sein, es müssen jedoch ausreichend viele Punkte auf korrespondierenden Objekten vorhanden sein. Der Algorithmus liefert die Verschiebung der Punktwolken in drei Richtungen. Die Qualität der Ergebnisse ist davon abhängig, wie viele korrespondierende Objekte für die Bestimmung der Verschiebung in jede Richtung vorhanden sind. Eine Aussage über die erreichbare Qualität innerhalb jeder Kachel kann auf Basis der nach dem Surface-Growing verbleibenden Punkte und ihrer Normalen getroffen werden (Gl. (2.13) bis Gl. (2.17)). Für ein gutes Ergebnis sollten die Normalenvektoren in alle drei Raumrichtungen etwa gleich häufig auftreten. In Mobile Mapping Punktwolken ist die Verschiebung in z-Koordinatenrichtung anhand der erfassten Straßenflächen mit nahezu vertikalen Normalen gut bestimmbar, die Verschiebung in der Lage ist stärker von den vorhandenen Objekten abhängig. Abb. 5.2 zeigt schematisch zwei Kacheln mit unterschiedlichen Objekten und deren Normalenvektoren, Objekte mit starker Streuung wurden bereits eliminiert. Die Ausdehnung der Kachel ist durch einen schwarzen Rahmen angedeutet, weiße Flächen enthalten keine Punkte. Abb. 5.2 (a) zeigt, dass entlang von Straßen häufig zwei Richtungen gut abgedeckt sind: Die Höhe (z) wird anhand der Straße (grau) und die Lage (im Beispiel x) quer zur Fahrtrichtung anhand von Fassaden (beige) definiert. Die Normalenvektoren sind in diesen Fällen mit blauen Pfeilen in x-Richtung und rot in z-Richtung angedeutet. Die dritte Koordinatenrichtung entlang der Straßenachse kann hier nicht bestimmt werden, da Flächen mit Normalenvektoren parallel zur Fahrtrichtung benötigt werden. Abb. 5.2 (b) zeigt eine ähnliche Situation mit zusätzlichen Fassaden senkrecht zur Straße und einem Zylinder, sodass die Verschiebung in y-Richtung ebenfalls ermittelt werden kann.

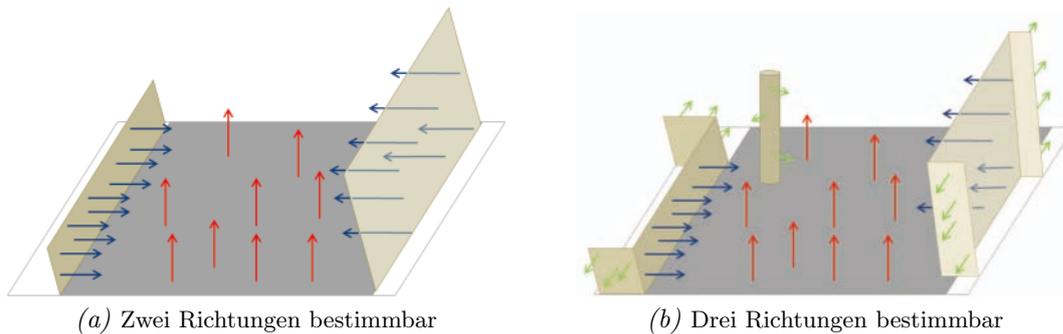


Abbildung 5.2.: Schematische Verteilung von Normalenvektoren innerhalb einer Kachel, Normalenvektoren eingefärbt nach Richtung (x blau, y grün, z rot). Je mehr Pfeile in einer Farbe vorhanden sind, desto besser ist diese Richtung bestimmbar.

Das Ergebnis des adaptierten ICP-Algorithmus in einer $10 \times 10 \text{ m}^2$ -Kachel ist in Abb. 5.3 dargestellt. Die Kachel enthält Normalen für alle drei Raumrichtungen: Flächen auf einem Gebäude mit unterschiedlichen Orientierungen und Punkte auf dem Boden im vorderen Teil der Kachel. Die Punkte einer Epoche sind nach ihrer Distanz zu den korrespondierenden Punkten der zweiten Epoche eingefärbt. Abb. 5.3 (a) zeigt die Abweichungen nach der ersten Iteration des ICP-Algorithmus, die in der Größenordnung von etwa 50 cm liegen. Abb. 5.3 (b) zeigt dieselbe Punktwolke nach der letzten Iteration des ICP-Algorithmus. Die Residuen zwischen korrespondierenden Punkten liegen in der gesamten Kachel unter 25 cm. Die Abweichungen zwischen den Punktwolken wurden entsprechend in alle drei Raumrichtungen reduziert.

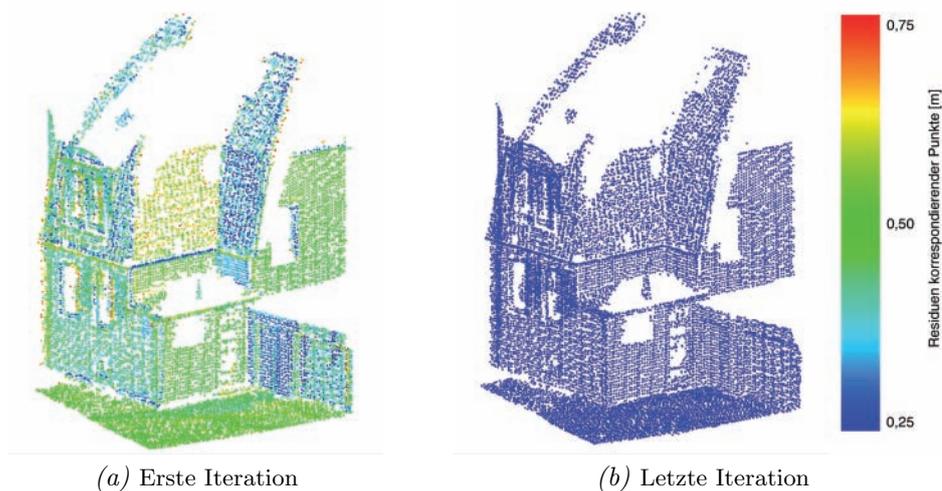


Abbildung 5.3.: Punkte einer Epoche eingefärbt nach den Residuen aus dem ICP-Algorithmus zwischen zwei Epochen in einer Kachel.

Ergebnisse

Für die Analyse wurde ein Gebiet mit einer Ausdehnung von etwa $150 \times 300 \text{ m}^2$ mit mehrgeschossiger Blockbebauung ausgewählt. Abb. 5.4 zeigt links einen Laserscan des Testgebiets und rechts den Ausschnitt des Orthophotos überlagert mit Straßentopografie und Gebäudegrundrissen aus Katasterdaten. Im Laserscan wurde die Straße als Grundfläche gewählt und blau eingefärbt. Die

Punkte oberhalb der Straße bis zu einer Höhe von 7 m werden mit einem Farbverlauf von grün bis orange gekennzeichnet. Alle Punkte ab einer Höhe von 7 m über der Straße wurden rot eingefärbt, dadurch werden z. B. Bäume hervorgehoben. Die Straßen im nördlichen Abschnitt liegen insgesamt zwischen drei und fünf Mal in unterschiedlichen Richtungen vor (grüne Pfeile), die Straßen im südlichen Abschnitt jeweils einfach (gelbe Pfeile). Die Breite der Pfeile gibt die Anzahl der Fahrten pro Richtung an. Die in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Straßen sind mit Bäumen bepflanzt. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit liegt bei 30 km/h, zusätzlich wird die Geschwindigkeit des Verkehrs durch plateauförmige Bremsschwellen in den Straßen reduziert. Im vorgestellten Gebiet ist aufgrund der Abschattung der Satellitensignale durch Bebauung und Bäume und der geringen Geschwindigkeiten bei der Erfassung eine große Verschiebung zwischen den Fahrten zu erwarten.

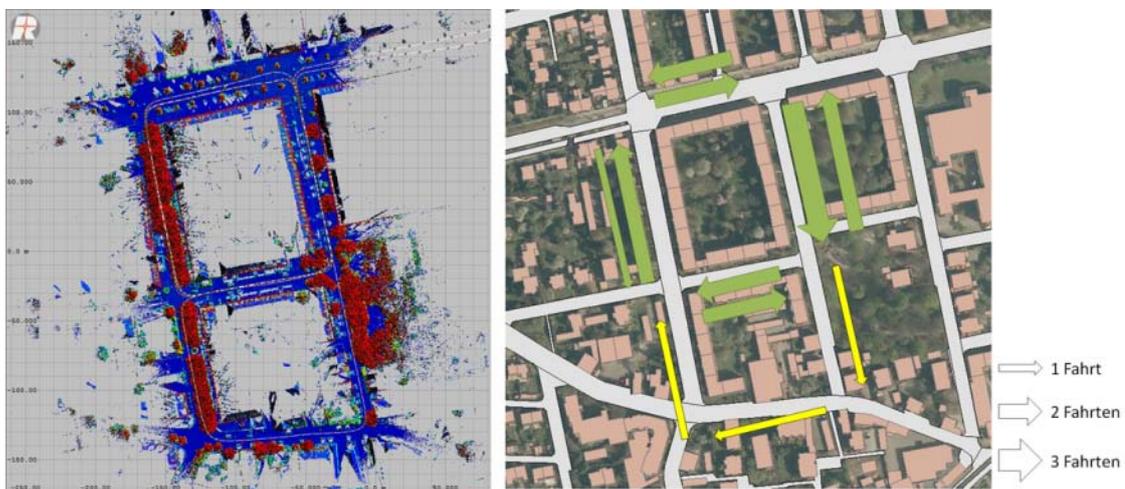


Abbildung 5.4.: Testgebiet zur Analyse der Datenqualität. Links: Laserscan eingefärbt nach der Höhe der Punkte über Grund (Screenshot RiPROCESS), Rechts: Orthophoto mit Straßen und Gebäudegrundrissen (Daten: LGLN) mit Anzahl der Fahrten und Fahrtrichtung (grün: mehrfach erfasst, gelb: einfach erfasst).

Die Punktwolken wurden in Kacheln mit Seitenlängen zwischen 5 m und 50 m partitioniert. Die Seitenlänge beeinflusst die Verteilung der Objekte in den Kacheln und definiert die Auflösung der Ergebnisse. Je größer die Kacheln sind, desto mehr Objekte mit unterschiedlichen Normalenvektoren können darin enthalten sein. Damit wird eine hohe Stabilität der Ergebnisse im ICP-Algorithmus erreicht. Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass die Residuen zwischen Punktwolken unterschiedlicher Epochen abhängig von der Positionierungsgenauigkeit des GNSS häufig nicht über größere Bereiche gleich sind, sondern sich abhängig von Mehrwegeeffekten und Abschattungen des Signals verändern. Eine Modellierung solcher Effekte kann nur mit kleinen Kacheln erfolgen. Die Wahl der Kachelgröße ist folglich sowohl von den erfassten Objekten als auch von der Stabilität der GNSS-Genauigkeit abhängig. Abb. 5.5 zeigt die Effekte bei geringer Positionierungsgenauigkeit in einer Straße als Residuen zwischen Punktwolken unterschiedlicher Epochen von 0 cm (blau) bis 20 cm (rot). Zwischen den gelben und roten Bereichen variieren die Residuen in diesem Beispiel um etwa 5 cm.

Die Vorprozessierung und der adaptierte ICP-Algorithmus zur Bestimmung der Translationsparameter erfordern die Definition verschiedener Parameter mit geeigneten Schwellenwerten. Für die verarbeiteten Mobile Mapping Punktwolken wurden die Schwellenwerte empirisch ermittelt.

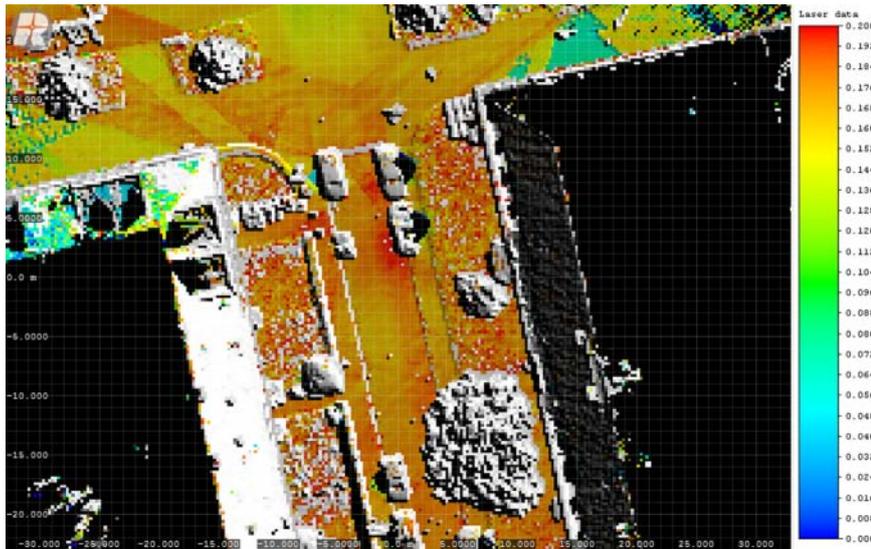


Abbildung 5.5.: Residuen in z -Richtung zwischen Punktwolken unterschiedlicher Epochen zwischen 0 cm (blau) und 20 cm (rot), Punkte mit > 20 cm Distanz zum niedrigsten Punkt in grau/weiß. Screenshot eines 30 m langen Abschnitts (RiPROCESS, Riegl LMS GmbH (2011)).

Die Parameter gelten pro Kachel für Seitenlängen zwischen 5 m und 25 m. In der Vorverarbeitung erfolgt die Berechnung der Punktnormalen in den zeitlich segmentierten Punktwolken mit 15 Nachbarn. Das folgende Surface-Growing filtert die Punktwolken zur Weiterverarbeitung im ICP-Algorithmus. Die Eigenschaften geeigneter Oberflächen wurden für die genutzten Daten wie folgt definiert: Aufgrund der hohen Punktdichte in den Punktwolken werden nur Punkte geprüft, die maximal 0,15 m von der Saatregion entfernt liegen, als minimale Größe einer akzeptierten Region wurden 500 Punkte gewählt und als zulässiger Winkel zwischen benachbarten Punktnormalen wird ein Winkel von bis zu 15° akzeptiert, da nicht nur Ebenen sondern auch stetig gekrümmte Oberflächen als geeignete Objekte akzeptiert werden sollen.

Der ICP-Algorithmus erfordert ebenfalls Schwellenwerte für die genutzten Parameter abhängig von den Daten. Da eine Punkt-zu-Ebene-Zuordnung erfolgt, kann die Dichte in den Punktwolken reduziert werden. Die maximale Dichte der beiden beteiligten Punktwolken R und S (mit R als Referenzpunktwolke) wurde mit $Res_R = 0,25$ m und $Res_S = 0,50$ m gewählt. Die Auflösung muss die Größe der Kacheln berücksichtigen. Kleine Kacheln mit wenigen Punkten benötigen eine höhere Auflösung als größere Kacheln. Die Berechnung und Triangulation der Ebene erfolgt anschließend mit 16 Nachbarn. Die maximale Distanz zu möglichen Kandidaten wird anhand der erwarteten Genauigkeit der Daten gewählt. Als Näherung werden die Genauigkeitsangaben der Trajektorie genutzt. Die Werte fallen in der Regel zu optimistisch aus, daher wird auf Basis empirischer Auswertungen der Punktwolken ein Faktor 2-3 an die erwartete Genauigkeit angebracht. Zusätzlich werden die minimale Änderung der berechneten Translation und die Anzahl der Iterationen des ICP-Algorithmus als Abbruchkriterien zur Beschränkung der Rechenzeit festgelegt. In den durchgeführten Tests zeigte sich eine minimale Anzahl von 10.000 Punkten in einer Kachel als geeignete Grenze. Kacheln mit weniger Punkten treten vor allem in Randbereichen eines erfassten Gebiets auf und haben eine sehr geringe Dichte oder enthalten nur wenige Objekte, sodass der ICP-Algorithmus keine nutzbaren Ergebnisse liefert.

Tabelle 5.1.: Evaluation der Kachelgröße anhand der im ICP-Algorithmus bestimmbaren Richtungen auf Basis der Normalenvektoren der verwendeten Regionen.

	Seitenlänge der Kacheln					
	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m	50 m
Anzahl Kacheln						
Gesamt	562	258	149	100	74	31
Ohne Ergebnis	60 11%	56 22%	33 22%	20 20%	13 18%	4 13%
Anzahl Kacheln mit						
1 Richtung	153 27%	18 7%	6 4%	2 2%	2 3%	0 0%
2 Richtungen	216 38%	54 21%	30 20%	15 15%	8 11%	3 10%
3 Richtungen	133 24%	130 50%	80 54%	63 63%	51 69%	24 77%

Zur Bewertung wurde die Gesamtanzahl der Kacheln im Projektgebiet und die Anzahl der Kacheln ohne Ergebnis verglichen. Kacheln ohne Ergebnis sind alle Kacheln, die nur Punktwolken einer Epoche enthalten oder für die nach der Filterung mittels Surface-Growing keine geeigneten Objekte verbleiben, sodass kein ICP-Algorithmus durchgeführt werden kann. Zusätzlich wird die Anzahl der in den Kacheln bestimmbaren Raumrichtungen (1, 2, oder 3) zur Bewertung der Kachelgröße genutzt. Diese ergibt sich aus den Punktnormalen der verschiedenen Epochen innerhalb jeder Kachel, die in drei Richtungen x , y und z klassifiziert werden. Gewertet wird die Anzahl der Richtungen nur dann, wenn sie in mindestens zwei Epochen bestimmbar sind. Bei den getesteten Seitenlängen von 5 m - 50 m können zwischen 11% und 22% der Kacheln nicht ausgewertet werden. Bei Seitenlängen zwischen 10 m und 25 m sind es ca. 20% der Kacheln, die nicht mittels ICP-Algorithmus analysiert werden können. Bei großen Kacheln führt dies zu einer größeren Fläche des erfassten Gebiets, für die kein Ergebnis bestimmt werden kann. Die Nutzung von Kacheln mit größerer Seitenlänge hat dennoch Vorteile, betrachtet man die Verteilung der Normalenvektoren der Punkte. Können bei einer Seitenlänge von 5 m für 24% der Kacheln die Verschiebungen in alle drei Achsrichtungen zuverlässig bestimmt werden, steigt dieser Wert auf 50% der Kacheln bei einer Seitenlänge von 10 m und auf rund 80% bei einer Seitenlänge von 50 m. Je größer die Kacheln, desto mehr geeignete Objekte finden sich innerhalb der Kacheln. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass nur drei Translationsparameter in einer starren Transformation für jede Kachel bestimmt werden. Bei großen Kacheln und den beschriebenen lokalen GNSS-Effekten mit geringer Positionierungsgenauigkeit, können die Residuen korrespondierender Punkte innerhalb einer Kachel groß bleiben, wenn diese nicht ausreichend durch eine starre Transformation modelliert werden. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Der genutzte ICP-Algorithmus liefert in jeder ausgewerteten Kachel für jedes Epochen-Paar eine Kofaktormatrix Q_{xx} zur Bewertung der Ergebnisse (Gl. (2.15), Kapitel 2.7). Für eine 2D-Darstellung werden nur die Elemente der x - und y -Richtung benötigt, d. h. die Submatrix $Q_{xx}(i,j)$ mit $i,j = 0..1$. Das Ergebnis für eine Seitenlänge von $10 \times 10 \text{ m}^2$ zeigt Abb. 5.6. Die Ellipsen sind für die Darstellung mit Faktor 10 vergrößert. Entlang der vier erfassten Straßen sind die Ellipsen in der Regel parallel zur Fahrtrichtung orientiert, da Normalenvektoren dort vorrangig an Fassaden sowie in den Punkten der Straße vorhanden sind. In Fahrtrichtung sind dagegen weniger Flächen zu

finden, sodass diese Richtung schlechter bestimmbar ist (Verteilung ähnlich Abb. 5.2 a). Nahezu kreisförmige Ellipsen finden sich in Kacheln, in denen die Verschiebungen sowohl in x- als auch in y-Richtung gleich gut bestimmbar sind. Diese treten vor allem an Kreuzungen auf, da dort häufig Fassaden mit unterschiedlicher Orientierung vorliegen (Abb. 5.2 b). Enthält eine Kachel mehr als zwei Punktwolken aus unterschiedlichen Epochen wird der ICP-Algorithmus paarweise zwischen allen Epochen ausgeführt und für jedes Paar eine Ellipse dargestellt.

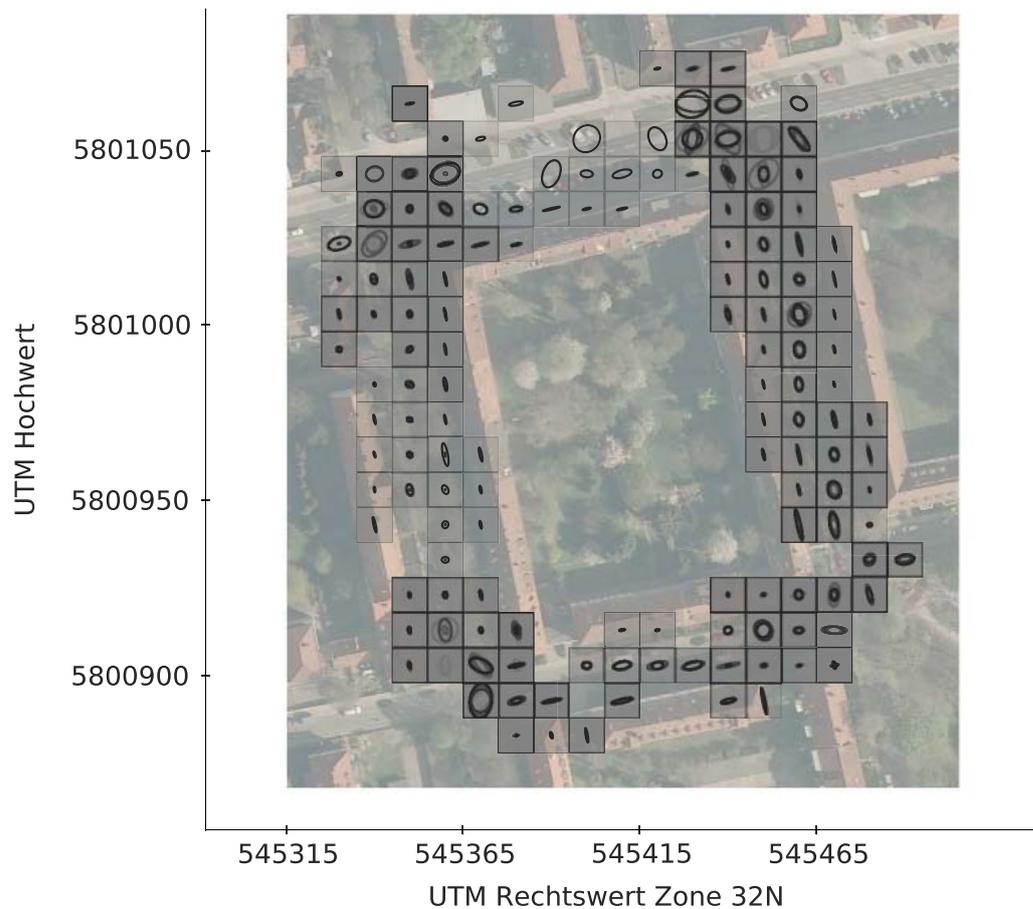


Abbildung 5.6.: Darstellung der Qualität des ICP-Algorithmus auf Basis der Normalenrichtungen (x,y) in den Punktwolken für jede Kachel. Ergebnis aus den Kofaktormatrizen des ICP-Algorithmus (Seitenlänge 10 m, Ellipsen skaliert mit Faktor 10).

5.2. Objektbasierter Ansatz

Der zweite getestete Ansatz nutzt segmentierte Objekte zur Genauigkeitsanalyse. Als geometrische Primitive wurden Ebenen und Zylinder gewählt, da sie in urbanen Gebieten häufig auftreten und als Kartenobjekte für Landmarken-Karten geeignet sind. Die Analyse erfolgt in zwei Stufen: Nach der automatischen Segmentierung wird die Qualität der Segmentierung hinsichtlich Korrektheit und Genauigkeit ausgewertet und anschließend die Genauigkeit der Punktwolken anhand der segmentierten Objekte überprüft. Dafür sind unterschiedliche Arten von Referenzdaten erforderlich. Während die Analyse der Segmentierung die Parameter der Objekte in der Punktwolke

benötigt, z. B. für einen Zylinder Mittelpunkt und Radius, sind für die Analyse der Genauigkeit der Punktwolke externe Referenzdaten der realen Objekte, etwa deren Koordinaten, erforderlich. Im folgenden Abschnitt wird die Generierung von Referenzdaten aus Punktwolken erläutert und die automatische Segmentierung von Zylindern und Ebenen vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Evaluation der automatischen Segmentierung und die Analyse der Genauigkeit der Punktwolken.

Manuelle Generierung von Referenzdaten aus den Punktwolken

Die Prüfung auf Vollständigkeit und Korrektheit der Segmentierung wird anhand von vollständigen Referenzdaten ermittelt. Referenzdaten von vertikalen Zylindern wurden für ein ausgewähltes Testgebiet teil-automatisch aus den Punktwolken erzeugt. Die Referenz enthält für jeden Zylinder in den Punktwolken eine manuell gewählte Zylinderscheibe. In jeder Scheibe wird eine Kreisschätzung durchgeführt und Mittelpunkt und Radius der Stange bestimmt. Fußpunkt und Höhe der Stange werden nicht ausgewertet, da nur eine 2D-Kreisschätzung durchgeführt wird. Die Referenz liefert daher nur Aussagen über die Lagegenauigkeit. In der Referenz sind Masten von Ampeln, Straßenbeleuchtung und Schildern sowie Baumstämme mit einem Durchmesser von weniger als 60 cm enthalten. Weitere Stangen, z. B. Absperrpfosten, werden ignoriert, wenn die Objekte einen Durchmesser von weniger als 10 cm haben. Diese Objekte enthalten zu wenige Punkte für eine zuverlässige Kreis- oder Zylinderschätzung. Enthalten die Punktwolken Daten aus unterschiedlichen Epochen, werden die Objekte vor der Parameterschätzung anhand des Zeitstempels getrennt, sodass jeder Parametersatz nur die Punkte einer Epoche berücksichtigt. Abb. 5.7 zeigt die Ergebnisse für drei manuell gewählte Ausschnitte aus Zylinderobjekten der Punktwolken. Die Zylinderscheiben werden so gewählt, dass die Daten keine Ausreißer enthalten. Zusätzlich wird die Höhe des Ausschnitts variabel festgelegt, sodass eine mögliche Abweichung der Zylinderachse aus der Lotrechten bei der Kreisschätzung keinen Einfluss hat. Objekte mit sehr wenigen Punkten werden aus einem größeren Ausschnitt bestimmt, um ausreichend viele Punkte für die Kreisschätzung zu erhalten.

Die Qualität der Referenzdaten wurde anhand des geschätzten Radius mehrfach erfasster Objekte untersucht. Die Koordinaten des Mittelpunkts können nicht zur Analyse der Referenzdaten genutzt werden, da die Position des Zylinder von der Positionierungsgenauigkeit des Mobile Mapping Systems abhängig ist. Der geschätzte Radius weicht bei 50% der Objekte um weniger als 5 mm, von der Referenz ab, bei weiteren 25% beträgt die Abweichung bis zu 20 mm. In den ausgewerteten Daten ist die Differenz mit dem Radius der Objekte korreliert, je größer der Radius eines Objekts, desto größer war die Differenz zur Referenz. Objekte mit einem Radius von bis zu 15 cm weichen im Mittel nur um 5 mm von der Referenz ab, Objekte bis 20 cm im Mittel 7 mm. Die mittlere Differenz für alle Objekte liegt bei 1,6 cm. Eine Erklärung für dieses Verhalten liefert die Objektart der untersuchten Zylinder. Während bis 20 cm Radius vor allem gleichmäßige, symmetrische Objekte wie Masten von Schildern, Ampeln und Straßenbeleuchtung enthalten sind, finden sich unter den Objekten mit größerem Radius vor allem Baumstämme, deren Querschnitt in der Regel nicht ideal kreisförmig ist und daher eine größere Unsicherheit in der Schätzung auftritt. Ein allgemeiner Zusammenhang zwischen der Anzahl der zur Schätzung genutzten Punkte und der Qualität der Schätzung konnte in den Daten nicht festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Objekte mit einem Radius bis 20 cm gut durch die manuellen Referenzdaten kontrollierbar sind. Als Ergebnis stehen Mittelpunkt, Radius und Standardabweichung der manuell ausgewählten und anschließend geschätzten Zylinder zur Verfügung. Insgesamt wurden 971 Objekte manuell segmentiert. Davon

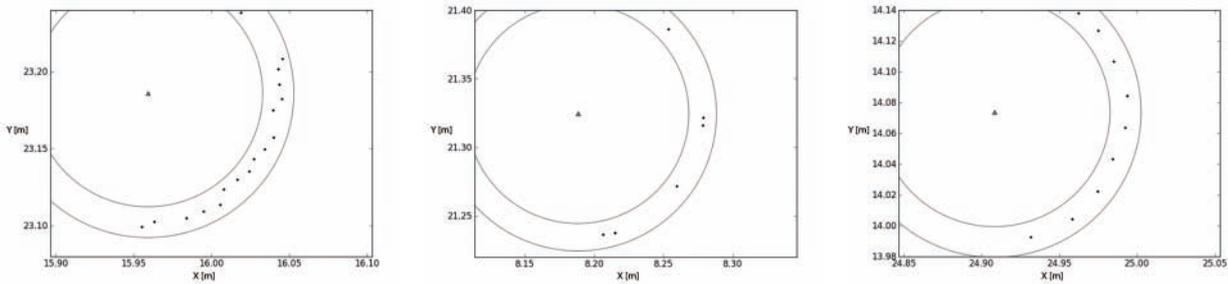


Abbildung 5.7.: Kreisschätzung in Zylinderscheiben der Mobile Mapping Daten nach zeitlicher Segmentierung der Punktwolke in einzelne Epochen.

lagen 51 Objekte in Kacheln mit weniger als 10.000 Punkten und wurden daher aus der Analyse ausgeschlossen. 86 manuell segmentierte Objekte haben einen Radius von mehr als 30 cm, 630 Referenzobjekte haben einen Radius bis zu 20 cm.

Die Analyse von automatisch segmentierten Ebenen erfolgt ebenfalls anhand von manuell erzeugten Referenzdaten. In 30 ausgewählten Kacheln mit Gebäuden wurden alle Fassaden-Ebenen manuell ausgewählt. Diese Referenzdaten enthalten 186 Fassaden auf einer Fläche von rund 2 ha. Die Parameter der Ebenen wurden sowohl mittels des RANSAC-Algorithmus als auch mit einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) geschätzt (Kapitel 2.8). Größere Vorsprünge und unterteilte Fassaden wurden als separate Objekte ausgewertet, da diese in einem automatisierten Algorithmus ebenfalls als einzelne Objekte segmentiert werden. Die PCA liefert für alle Fassaden den Schwerpunkt mit 3D-Koordinaten, den Normalenvektor, die Ausdehnung der Ebene anhand der vier Eckpunkte und die Standardabweichung der zur Schätzung genutzten Punkte.

Automatische Segmentierung von Zylindern

Die Methode zur Segmentierung von vertikalen zylindrischen Objekten aus Punktwolken ist von der Punktdichte in den Daten abhängig. Punktwolken mit hoher Punktdichte, die die Oberfläche schmaler Objekte, z. B. Masten von Verkehrszeichen, detailliert abbilden, erlauben die Verwendung von Punktnormalen zur Schätzung. Punktwolken mit geringerer Dichte stellen schmale Objekte mit weniger Punkten dar und benötigen ein vereinfachtes Modell. In der vorliegenden Arbeit wird das Verfahren von Brenner (2009) in Punktwolken geringer Dichte zur Segmentierung von linearen, vertikalen Objekten genutzt. Beispielhaft werden die Daten einer Streetmapper-Punktwolke (Kremer und Hunter, 2007) gezeigt. In dichten Punktwolken wird das Verfahren von Brenner (2009) als Vorsegmentierung eingesetzt und durch eine Parameterschätzung mittels Punktnormalen ergänzt. Das Verfahren nutzt die Annahme, dass die gewünschten Zylinder durch lineare, vertikal freistehende Objekte mit einem begrenzten maximalen Durchmesser modelliert werden können. Zur Segmentierung wird die Punktwolke in einer Ebene gerastert und zusätzlich in gleichmäßige Höhenzellen unterteilt. Die Radien r_1 und r_2 müssen abhängig von den gewünschten Objekten definiert werden: Sie geben zum Einen den Bereich an, in dem sich Punkte einer Stange befinden müssen ($< r_1$) und zum Anderen einen Bereich um die Stange herum, der keine Punkte enthalten darf (zwischen r_1 und r_2). Die zweite Bedingung ist nur für freistehende Objekte erfüllt. Die Auswertung der Punkte mit r_1 und r_2 erfolgt in jeder Höhenzelle separat. Alle Höhenzellen, die die Bedingungen für r_1

und r_2 an der betrachteten Position erfüllen, werden als Stangen-Kandidaten markiert. Werden innerhalb einer Rasterzelle eine definierte Anzahl Höhenzellen als Kandidaten detektiert, zählt das Objekt zu den Stangen. Ein großer Vorteil des Verfahrens ist die Möglichkeit der Auswertung von Daten unterschiedlicher Punktdichte und mit geringer Dichte wie in Abb. 5.8 (a) und (b). Die Objektpunkte bilden in diesem Fall keine zylindrische Oberfläche (und damit keinen kreisförmigen Querschnitt wie in (b) erkennbar), sodass die Zylinderparameter nicht auf Basis der Oberfläche ermittelt werden können. Der Mittelpunkt der Zylinder berechnet sich dann aus dem Schwerpunkt der segmentierten Punkte. Im Vergleich dazu zeigen die Abbildungen 5.8 (c) und (d) Daten einer Punktwolke mit hoher Dichte, welche eine Schätzung der Zylinderparameter anhand der Oberfläche erlaubt.

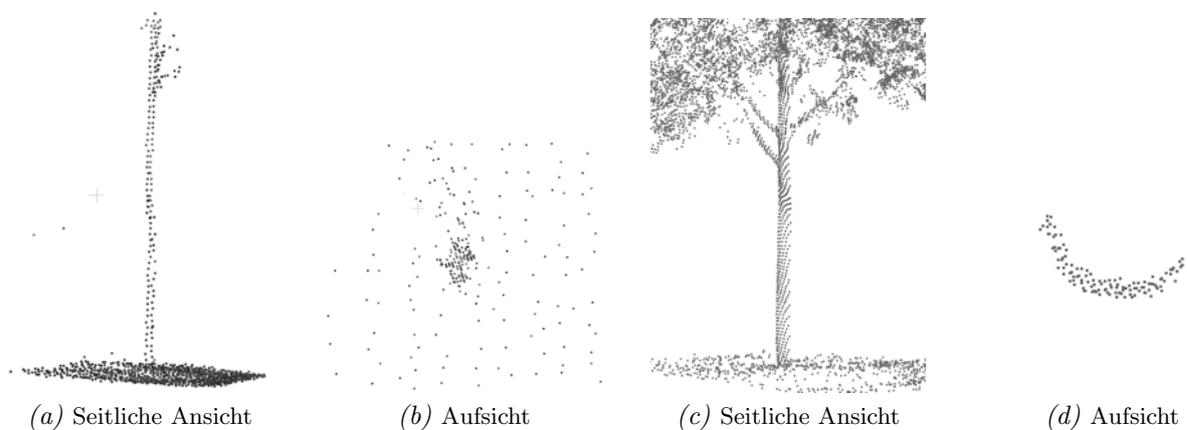


Abbildung 5.8.: Vergleich der 3D-Punktwolken einer Stange in unterschiedlich dichten Datensätzen (erfasst mit Streetmapper (a), (b) und RIEGL VMX-250 (c), (d)).

In dichten Punktwolken wird die beschriebene Vorsegmentierung durch eine Parameterschätzung anhand der Oberfläche ergänzt (Kapitel 2.8). Die Zylinderschätzung mittels RANSAC-Algorithmus nutzt einen minimal und maximal zulässigen Radius des Zylinders und die gewichteten Punktnormalen der vorsegmentierten Punkte (Rusu und Cousins, 2011). Benötigt werden Schwellenwerte für die zulässige Abweichung eines Punktes zum geschätzten Zylinder und die maximale Anzahl Iterationen. Abb. 5.9 zeigt das Ergebnis der Zylinderschätzung am Beispiel einer Stange mit Straßennamenschildern und Abfallbehälter. Die Originalpunkte des Objekts enthalten eine Stange mit zwei Schildern und einen Abfallbehälter im unteren Teil (a). Die Punkte der Straßennamenschilder wurden bereits in der Vorsegmentierung durch die gewählten Parameter eliminiert. Der Abfallbehälter liegt dagegen vollständig innerhalb des definierten Radius r_1 und wurde daher nicht entfernt. Haben solchen Fehler-Objekte im Verhältnis zur Stange viele Punkte, vor allem bei Stangen mit kleinem Durchmesser, muss der Einfluss der Fehler durch eine zusätzliche Filterung der Punktwolke vor der Schätzung der Zylinderparameter reduziert werden. Dazu wird das Objekt in Höhenzellen unterteilt und der maximale 2D-Abstand innerhalb jeder Höhenzelle ermittelt. Der Median des maximalen Abstands aller Höhenzellen wird genutzt, um Höhenzellen mit Ausreißern zu detektieren, wobei die Bedingung erfüllt sein muss, dass mindestens 50% der Höhenzellen keine Ausreißer enthalten. Anschließend wird die Zylinderschätzung nach Rusu und Cousins (2011) ausgeführt und erzeugt das in Abb. 5.9 (b) dargestellte Ergebnis. Abb. 5.9 (c) zeigt das Ergebnis der Zylinderschätzung von oben. Links ist die Ausdehnung des gesamten Objekts mit den beiden

Straßennamensschildern als nahezu vertikale und horizontale Linien dargestellt. Diese werden in der groben Vorsegmentierung zuverlässig entfernt. Die Stange ist als Halbkreis am Schnittpunkt der Schilder zu erkennen, unterhalb ist ein Abfallbehälter an der Stange angebracht. Rechts ist der Ausschnitt um die Stange vergrößert und das Ergebnis der Zylinderschätzung als grüner Kreis dargestellt.

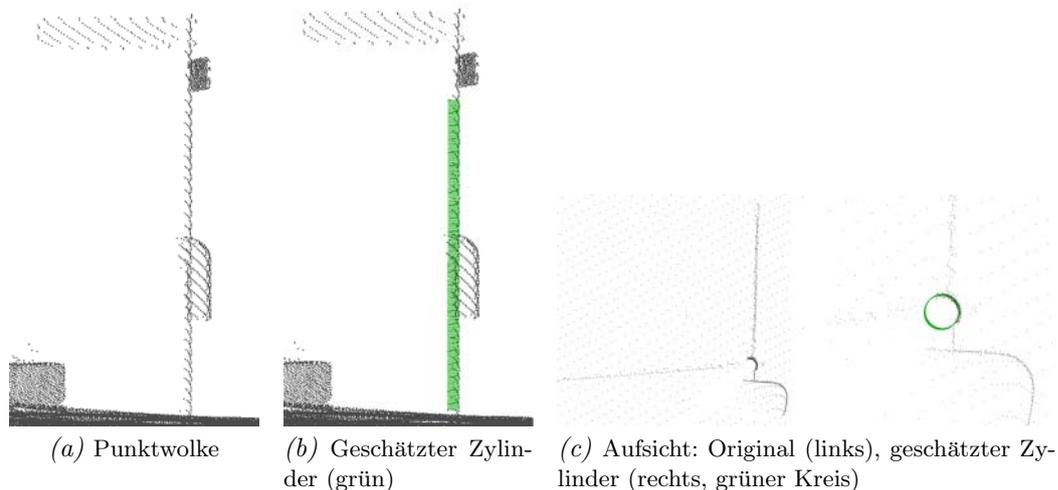


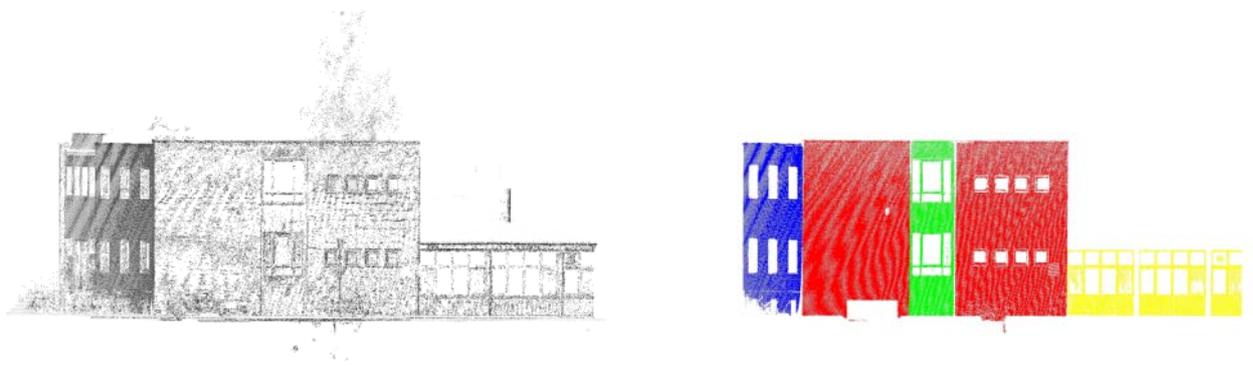
Abbildung 5.9.: Zylinderschätzung mit Punktnormalen für eine Stange mit zwei Schildern und Abfallbehälter. Zylinderschätzung mittels RANSAC-Algorithmus, zusätzliche Filterung von Ausreißern.

Automatische Segmentierung von Ebenen

Die Extraktion von Ebenen basiert auf dem von Schnabel u. a. (2007) entwickelten Ansatz (Kapitel 2.8). Um die Anzahl der Ebenen für die Auswertung einzugrenzen, sollen nur Ebenen auf Fassaden segmentiert werden, die eine vorgegebene Minimalgröße aufweisen und senkrecht orientiert sind. Der Algorithmus von Schnabel u. a. (2007) erlaubt eine Einschränkung der Ebenen anhand einer minimalen Punktzahl, für Fassaden wurde aufgrund der hohen Punktdichte eine minimale Anzahl von 10.000 Punkten festgelegt. Im Anschluss an die automatische Segmentierung wurden die Ebenen anhand ihres Normalenvektors und ihrer Höhe gefiltert, um nur potentielle Fassaden zu erhalten. Die Filterung erlaubt nur Ebenen, deren Normale nahezu horizontal ist. Als Grenzwert wurde eine maximale Abweichung von 5° aus der Horizontalen zugelassen. Als weitere Bedingung wurde eine minimale Höhe von 3 m für alle Ebenen angegeben, die sich aus einer geschätzten mittleren Raumhöhe in Gebäuden ableitet. Die Beschreibung von Fassaden erfolgt anhand des Normalenvektors, eines beliebigen Punkts der Ebene, ihrer Ausdehnung durch die vier Eckpunkte und der Standardabweichung der zur Ebene gehörenden Punkte. Die Orientierung des Normalenvektors ist unabhängig von der Trajektorie, und kann daher vom Gebäude weg oder zum Gebäude hin zeigen. Dies muss bei der Zuordnung korrespondierender Fassaden berücksichtigt werden.

Eine visuelle Kontrolle der Daten zeigt, dass die automatische Segmentierung häufig Ebenen liefert, deren Diagonale einige Meter von der tatsächlichen Größe der Fassade abweicht. Ein Grund dafür sind einzelne Punkte in der geschätzten Ebene, die jedoch zu einem anderen Objekt gehören, z. B. Punkte auf Gebäudevorsprüngen benachbarter Fassaden. In der Regel handelt es sich um wenige

Punkte, die räumlich von der tatsächlichen Fassade getrennt sind. Diese werden im Anschluss an die Segmentierung der Ebenen mittels eines Region-Growing-Verfahrens eliminiert. Als Kriterium zur Gruppierung wird der Abstand zwischen den verschiedenen Regionen innerhalb einer Ebene genutzt. Der maximal zulässige Abstand wird manuell gewählt und muss größer sein, als der Abstand der Scanlinien in der Punktwolke. Abhängig von der Gesamtanzahl der Punkte in einer Ebene, werden kleine Regionen anschließend entfernt. Für die getesteten Daten zeigte sich ein Wert von 10% der Gesamtpunktzahl als geeigneter Schwellenwert. Für die verbleibenden Regionen werden die Ebenenparameter neu geschätzt. Abb. 5.10 zeigt die Originalpunkte einer Kachel (a) und die daraus automatisch segmentierten Fassaden in unterschiedlichen Farben (b).



(a) Original Punktwolke

(b) Vier automatisch segmentierte Ebenen, durch unterschiedliche Farben dargestellt

Abbildung 5.10.: Segmentierung von Fassaden in einer Kachel aus einer Punktwolke des RIEGL VMX-250.

Evaluation der automatische Segmentierung

Die Qualität der automatischen Extraktionsalgorithmen wird für Zylinder und Ebenen anhand der beschriebenen Referenzdaten überprüft, indem die Parameter automatisch segmentierter Objekte mit den korrespondierenden manuellen Referenzobjekten verglichen werden. Auf diese Weise kann sowohl die Korrektheit der Segmentierung, d. h. die Anzahl der korrekt als Zylinder oder Ebene segmentierten Objekte, als auch die Genauigkeit der Parameter analysiert werden. Die Korrektheit der Segmentierung wird anhand der korrekt positiven, sowie der falsch positiven und falsch negativen Objekte angegeben. Liegt für ein automatisch segmentiertes Objekt keine Referenz vor, wird dieses als falsch positiv klassifiziert. Referenzobjekte, für die kein Objekt automatisch segmentiert wurde, werden als falsch negative Ergebnisse gewertet.

Die Analyse der Zylindersegmentierung erfolgte in Kacheln mit einer Seitenlänge von 25 m. Die Punktwolken innerhalb jeder Kachel wurden in einzelne Epochen getrennt. Für jeden Zylinder in der realen Welt können daher mehrere Objekte segmentiert werden, die aufgrund der Positionierungsgenauigkeit unterschiedliche Koordinaten aufweisen. Die Kacheln enthalten im Mittel 550.000 Punkte. Kacheln mit weniger als 10.000 Punkten wurden aus der Auswertung ausgeschlossen, um ausreichend dichte Punktwolken an den segmentierten Objekten zu erhalten. Die Vorsegmentierung wurde mit zwei unterschiedlichen Werten für den inneren Radius ($r_1 = 30$ cm und $r_1 = 50$ cm) durchgeführt, sodass die gewünschten Objekte (z. B. Masten von Ampeln und Verkehrszeichen sowie kleinere Bäume) erhalten bleiben. Mit $r_1 = 30$ cm wurden aus dem analysierten Datensatz

insgesamt 1198 Objekte automatisch segmentiert, davon 535 Objekte korrekt, was 55% der 971 Referenzobjekte entspricht. 436 Objekte (45%) wurden vom automatischen Algorithmus nicht segmentiert und als falsch negativ klassifiziert. Die Verteilung der Klassifikation ist in Abb. 5.11 (a) dargestellt. Die meisten falsch negativen Ergebnisse finden sich in der Radien-Klasse von 20 cm - 30 cm mit 193 nicht automatisch segmentierten Objekten (279 Objekte zwischen 20 cm und 50 cm). Der Radius zur Vorsegmentierung muss folglich größer gewählt werden, um Objekte in der Nähe des zulässigen Radius zuverlässig zu segmentieren. Bei einer Vorsegmentierung mit $r_1 = 50$ cm werden 1661 Zylinder automatisch segmentiert, davon 690 korrekt und 971 falsch positiv. Von den 219 falsch negativen Ergebnissen bei $r_1 = 50$ cm liegen nur noch 104 Objekte in den Radien-Klassen von 20 cm bis 50 cm (Abb. 5.11 (b), FP).

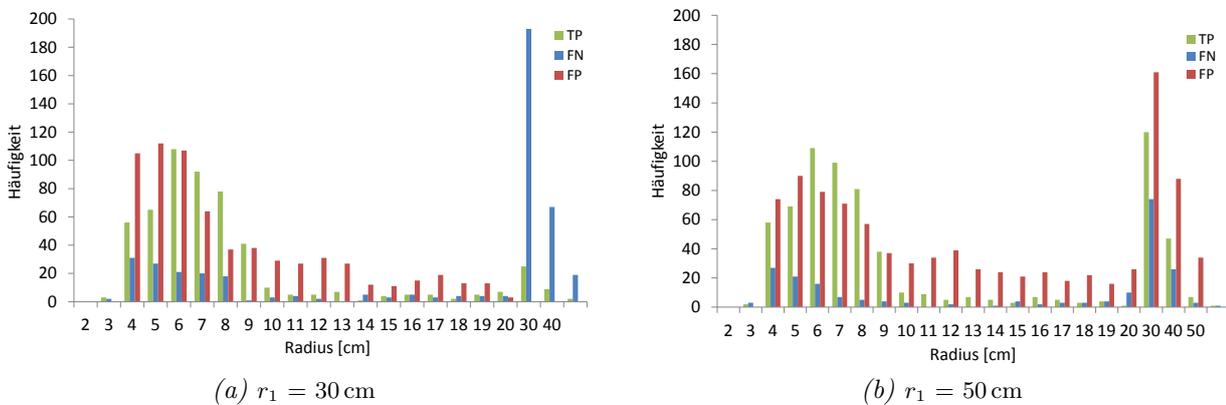


Abbildung 5.11.: Bewertung automatisch segmentierter Zylinder mittels Referenz mit korrekten (TP, grün), falsch positiven (FP, rot) und falsch negativen (FN, blau) Ergebnissen der Segmentierung. Der Radius [cm] auf der x-Achse gibt den Wert der Klassenobergrenze an.

Problematisch für die Auswertung ist die große Anzahl von falsch positiven (FP) Objekten, 663 FP bei $r_1=30$ cm sowie 971 FP-Objekte bei $r_1=50$ cm. Um den Datensatz zu bereinigen, werden die FP-Objekte in einer anschließenden Filterung anhand der Anzahl der Einzelobjekte pro Referenz-Zylinder und der zur Schätzung genutzten Punktzahl eliminiert. Die Anzahl der Einzelobjekte pro Zylinder kann mit $2 * \text{Anzahl Fahrten}$ abgeschätzt werden, da jeder Zylinder mit dem VMX-250 pro Fahrt zweimal erfasst wird. Die Punktzahl auf einem Objekt ist abhängig von der Größe des Objekts, von der Entfernung zum Mobile Mapping System und von der Fahrtgeschwindigkeit. Die Punktzahl kann aus den Daten des Mobile Mapping Systems (Kapitel 2.5) und der Fahrtgeschwindigkeit abgeschätzt werden, für eine Stange mit einem Durchmesser von 20 cm, einer Höhe von 3 m und einer Entfernung zum Messsystem von 10 m bei einer Geschwindigkeit von 10 m/s ergibt sich eine Punktzahl von etwa 300 Punkten auf dem Zylinder. Abb. 5.12 (a) zeigt die Häufigkeit der korrekt, falsch negativ und falsch positiv klassifizierten Objekte für die Anzahl der Einzelobjekte pro Zylinder. Mit einem inneren Radius von $r_1 = 30$ cm werden 137 Zylinder nur einmal segmentiert, davon 124 Objekte falsch positiv, 6 Objekte korrekt und 7 Objekte falsch negativ, d.h. nur 1% der realen Zylinder werden durch ein Objekt repräsentiert. Diese Objekte können aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden, da die Ergebnisse nicht durch mindestens ein zweites korrespondierendes Objekt verifizierbar sind. Zusätzlich wird die Anzahl der zur Schätzung verwendeten Punkte in Abb. 5.12 (b) analysiert. Etwa 40% aller falsch positiven Objekte enthalten maximal 20 Punkte zur Schätzung, dagegen enthalten knapp 50% der korrekt segmentierten

Ergebnisse mehr als 300 Punkte zur Schätzung und nur 3% der korrekt segmentierten Objekte werden durch weniger als 20 Punkte repräsentiert. Die Punktzahl kann daher ebenfalls als Kriterium zur Eliminierung falsch positiver Objekte genutzt werden, ohne die korrekten Ergebnisse zu beeinflussen. Der analysierte Datensatz mit $r_1 = 30$ cm enthält nach der Filterung der falsch positiven Zylinder noch 514 Objekte, was einem Anteil von 96% der korrekt segmentierten Ergebnisse entspricht. Die Genauigkeit der Zylindersegmentierung wird anhand der manuellen Referenzdaten für die korrekt segmentierten Objekte bis zu einem Radius von 20 cm analysiert. Die Beschränkung der Radien erfolgt aufgrund der Referenzdaten, die eine gute Kontrollierbarkeit der Daten nur bis zu einem Radius von 20 cm zeigen. Diese Objektgröße ist ausreichend, da die gewünschten Objekte, wie Stangen von Verkehrszeichen, Masten der Straßenbeleuchtung bzw. von Ampeln und kleinere Bäume, darin enthalten sind. Der Radius der automatisch segmentierten Zylinder wird im Mittel um 1,6 mm zu klein geschätzt mit einer Standardabweichung von 1,4 cm (1σ). Die Position der automatisch segmentierten Zylinder weicht im Mittel um 3,3 cm mit einer Standardabweichung von 3,5 cm von der manuellen Referenz ab. Die Parameter Radius und Mittelpunkt korrekt segmentierter Zylinder können für Objekte mit einem Radius bis zu 20 cm mit guter Genauigkeit bestimmt werden. Trotz Filterung verbleibt eine große Anzahl falsch positiver Objekte im Datensatz, sodass die Objekte vor der Verwendung als Kartenobjekte zusätzlich geprüft und durch eine weitere Messung verifiziert werden müssen.

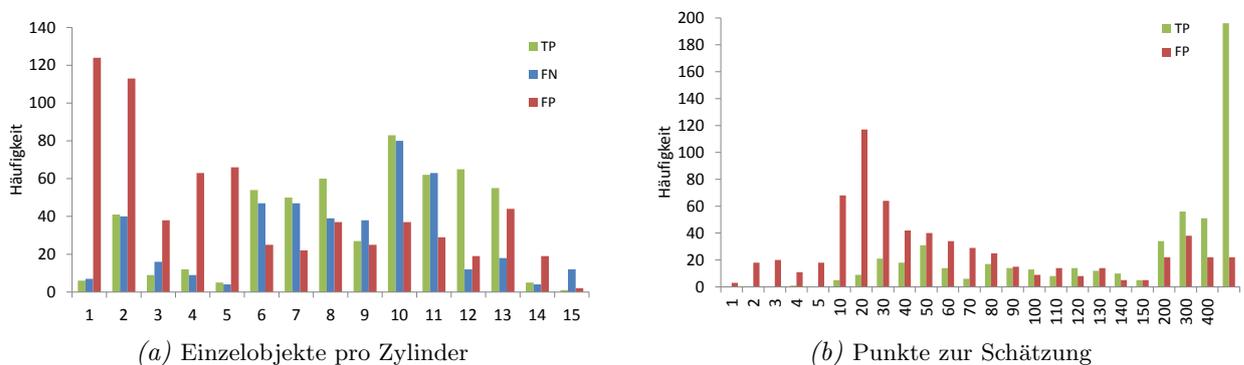


Abbildung 5.12.: Analyse der Segmentierung zur Eliminierung falsch positiver Ergebnisse für $r_1 = 30$ cm mit korrekten (TP, grün), falsch positiven (FP, rot) und falsch negativen (FN, blau) Ergebnissen.

Die Zuordnung der automatisch segmentierten Fassaden zu den korrespondierenden Referenzobjekten erfolgt automatisch anhand des Abstands zwischen den Objekten. In den getesteten Daten wurden 65% der Fassaden (120 Objekte) korrekt segmentiert. Etwa 35% der Referenzebenen wurden nicht automatisch segmentiert und liefern damit ein falsch negatives Resultat. Falsch positive Ergebnisse lagen bei etwa 20 automatisch segmentierten Objekten vor, für die keine korrespondierenden Referenz existiert. Die Genauigkeit der geschätzten Parameter wird anhand der korrekt segmentierten Fassaden sowie den korrespondierenden Referenzebenen analysiert. Die Auswertung vergleicht den Abstand zwischen den Ebenen sowie den Winkel zwischen den Normalen der automatisch und der manuell segmentierten Ebene. Die Ausdehnung der Ebenen wird für die Analyse nicht genutzt, da in der automatischen Schätzung kein Region-Growing zur Elimination von weiter entfernt liegenden Punkten durchgeführt wird. Die Distanz zwischen den segmentierten Ebenen und der Referenz liegt im Mittel bei 1,8 cm, der Median der Distanzen beträgt nur 0,3 cm. Die

Differenz der Normalenvektoren beträgt $0,17^\circ$ (Mittelwert) und $0,09^\circ$ (Median). Eine Auswertung der Distanzen zeigt, dass 90 Ebenen (75%) maximal 1 cm von der Referenz entfernt liegen. Etwa 85% dieser Objekte haben eine Distanz von weniger als 5 mm zu ihrer Referenz. Die übrigen 30 geschätzten Ebenen haben eine Distanz von maximal 10 cm, und nur etwa 7,5% liegen im Bereich von mehr als 9 cm bis 10 cm. Die Analyse der Normalenvektoren bestätigt die hohe Genauigkeit der Parameterschätzung. Bei 90 Ebenen weichen die Normalen um maximal $0,2^\circ$ von der Referenz ab. Die maximale Abweichung liegt bei etwa 3° , insgesamt weisen aber nur knapp 10% aller Objekte eine Winkeldifferenz von mehr als $0,5^\circ$ auf. Die automatische Segmentierung und Schätzung der Ebenenparameter erzielt für die getesteten Daten sehr gute Ergebnisse.

Genauigkeit der Punktwolken

Die Genauigkeit der 3D-Punktwolken wurde mit Hilfe von tachymetrisch erfassten Masten und Fassadenpunkten ausgewertet (Curs u. a., 2013). Die Aufnahme der Referenzpunkte erfolgte zeitgleich mit der Erfassung der Mobile Mapping Punktwolken, daher können Abweichungen in den Daten durch Baumaßnahmen ausgeschlossen werden. Für die Referenz wurde eine Genauigkeit von $< 2\text{ cm}$ (1σ) gefordert, sodass zur Vermessung ein Netz von Anschlusspunkten angelegt wurde. Die Vermessung erfolgte mit einer Totalstation Trimble S6, die den Vorteil der reflektorlosen Distanzmessung bietet. Insgesamt wurden 460 Punkte auf 48 Fassaden erfasst. Aus den Einzelpunkten wurde für jede Fassade eine Ebene geschätzt, die als Referenzobjekt für die segmentierten Ebenen der Punktwolken dient. Zusätzlich wurden die Koordinaten von 128 Masten der Straßenbeleuchtung aufgenommen. Die Höhe der Objekte wird in diesem Beispiel nicht ausgewertet, da die Referenz ohne definierte Höhenpunkte erfasst wurde. Die Verteilung der erfassten Fassadenpunkte (rot) und Masten (gelb) im Testgebiet zeigt Abb. 5.13.



Abbildung 5.13.: Verteilung der Referenzobjekte auf Fassaden (rote Punkte) und Masten von Straßenbeleuchtung (gelbe Punkte). Orthophotos, Grundrisse und Straßenflächen: LGLN.

Die Genauigkeit der Zylinder wurde für ein Gebiet mit einer Ausdehnung von $150 \times 300\text{ m}^2$ anhand der Masten der Straßenbeleuchtung ermittelt. Den automatisch segmentierten Zylindern wurden

16 Masten der Referenzdaten anhand des Abstands zugeordnet. Die Objekte der Punktwolken wurden aus 12 Kacheln 51 Mal automatisch und 65 Mal manuell segmentiert. Die Lagedifferenz zwischen den geschätzten Zylinderpositionen und den Referenzobjekten beträgt in x-Richtung im Mittel 10,6 cm (8,3 cm) für die automatische (manuelle) Segmentierung mit einer Standardabweichung von 7,5 cm (6,3 cm). In y-Richtung liefert die automatische (manuelle) Segmentierung einen Mittelwert von 10,4 cm (8,7 cm) mit einer Standardabweichung von 8,0 cm (5,3 cm) (Tabelle 5.2). Betrachtet man die gesamte Abweichung der Positionen beträgt diese im Mittel 16,4 cm (13,6 cm) mit einer Standardabweichung von 8,5 cm (5,3 cm) bei automatischer (manueller) Segmentierung der Zylinder. Der geringe Unterschied zwischen automatischer und manueller Segmentierung zeigt, dass die automatische Segmentierung zur Genauigkeitsanalyse genutzt werden kann. Die Differenzen zwischen minimaler und maximaler Distanz (Tabelle 5.2) entstehen nicht durch eine fehlerhafte Segmentierung, sondern aufgrund von GNSS-Effekten, die die Trajektorie im untersuchten Gebiet unterschiedlich stark beeinflussen.

Tabelle 5.2.: Distanzen der geschätzten Mittelpunkte automatisch und manuell segmentierter Zylinder aus Mobile Mapping Punktwolken zu tachymetrisch erfassten Referenzdaten.

	Automatisch		Manuell	
	Δx	Δy	Δx	Δy
Minimale Distanz [cm]	0,1	0,3	0,6	0,5
Maximale Distanz [cm]	28,7	29,0	25,3	20,8
μ [cm]	10,6	10,4	8,3	8,7
σ [cm]	7,5	8,0	6,3	5,3

Zusätzlich zu den Zylindern wurde die Genauigkeit der Punktwolken anhand von Ebenen analysiert. Im Testgebiet liegen 48 Fassaden vor, jeweils mit mindestens vier tachymetrisch gemessenen Punkten. Abb. 5.14 zeigt diese Fassaden als Ebene (gelb) in der Punktwolke. Die Distanzen zwischen der Referenz und den automatisch segmentierten Ebenen der Punktwolken liegen zwischen -34,2 cm und 17,5 cm, wobei ein negatives Vorzeichen angibt, dass die Punktwolke, vom Scanner aus gesehen, hinter der Referenz liegt. Der Mittelwert der Verteilung liegt bei -9,9 cm mit einer Standardabweichung von 10,4 cm (1σ). Die Verschiebung in negativer Richtung ergibt sich in diesem Fall daraus, dass die Referenzdaten nicht systematisch auf gegenüberliegenden Fassaden erfasst wurden.

5.3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Kapitel beschreibt zwei Verfahren zur Analyse der Genauigkeit von Mobile Mapping Punktwolken. Ein ICP-basierter Ansatz nutzt unstrukturierte Punktwolken zur Ermittlung der Residuen zwischen verschiedenen Epochen. Lokale Unterschiede in der Genauigkeit der Georeferenzierung können durch die Aufteilung der Daten in Kacheln ermittelt werden. Der zweite Ansatz nutzt segmentierte Objekte zur Analyse der Genauigkeit der Punktwolken.

Die Genauigkeitsanalyse auf Basis von Punktwolken in Kacheln ermöglicht eine schnelle Visualisierung der Datenqualität für große Projektgebiete. Die Methode liefert eine Übersicht über die

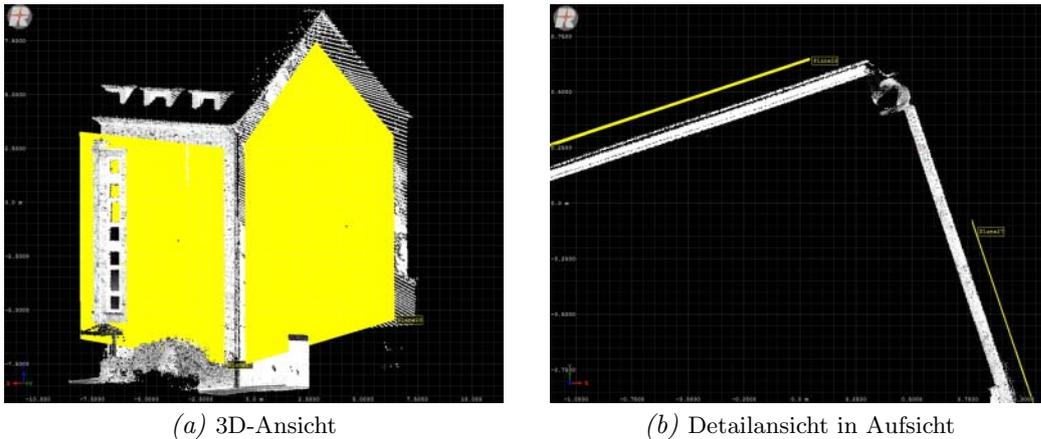


Abbildung 5.14.: Vergleich der Mobile Mapping Punktwolke eines Wohngebäudes (weiße Punkte) mit zwei Referenzebenen (gelb), tachymetrisch durch vier Punkte erfasst. Auswertung und Visualisierung in der Software RiPROCESS.

Daten und die Möglichkeit diese mit Zusatzinformationen, z. B. Orthophotos, zu ergänzen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Analyse der Genauigkeit unabhängig von Objekten ist, da keine Segmentierung definierter Objektarten erfolgt. Zusätzlich ist die Genauigkeit nahezu flächendeckend ermittelbar, solange die Punktwolken in mehreren Epochen vorliegen und ausreichend viele ebene oder stetig gekrümmte Objekte vorhanden sind. Der Verzicht auf segmentierte Objekte hat allerdings den Nachteil, dass ein Vergleich mit Referenzobjekten aus unabhängigen Datenquellen nicht direkt möglich ist. Eine weitere Schwierigkeit entsteht durch Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung korrespondierender Punkte im ICP-Algorithmus. Der ICP-Algorithmus findet genau eine Lösung zur Minimierung der Residuen, wobei dies auch ein lokales Minimum sein kann. Dieses Problem tritt vor allem dann auf, wenn zu wenige Objekte mit unterschiedlicher Orientierung in den Punktwolken vorliegen. Vor allem kleine Kacheln zur Analyse lokaler GNSS-Effekte enthalten nicht genügend viele Objekte mit unterschiedlichen Normalenvektoren, sodass der ICP-Algorithmus keine zuverlässigen Ergebnisse für alle drei Raumrichtungen liefert. Große Kacheln mit ausreichend vielen Objekten unterschiedlicher Orientierung können dagegen GNSS-Effekte innerhalb einer Kachel nicht darstellen, da nur drei Translationsparameter pro Kachel mittels des starren ICP-Algorithmus bestimmt werden.

Die Verwendung segmentierter Objekte bietet den Vorteil, dass relevante Objekte für Landmarken-Karten analysiert werden und eine Aussage zur Genauigkeit der Kartenobjekte liefern. Die Qualität der Segmentierung ist allerdings nur mit aufwändig manuell erstellten Referenzdaten möglich, solange keine Kartengrundlage vorhanden ist. Zur Aktualisierung von Karten können die bereits vorhandenen Objekte als Referenz für die Qualität der Segmentierung genutzt werden. Die Ergebnisse zeigen eine Genauigkeit im Bereich weniger Zentimeter bis Dezimeter für die Mobile Mapping Punktwolken. Die Genauigkeit ist nicht konstant und hängt von den GNSS-Bedingungen und der Fahrdynamik während der Erfassung ab. Gerade in häufig erfassten städtischen Gebieten sind die Auswirkungen der Positionierung des Mobile Mapping Fahrzeugs groß. Für hochgenaue Karten müssen die Mobile Mapping Punktwolken daher verbessert werden. Ein Verfahren zur Ausgleichung der Punktwolken unter Verwendung von Scanstreifen, Trajektoriendaten und zusätzlichen Referenzdaten wird daher im folgenden Kapitel vorgestellt.

6. Streifenbasierte Ausgleichung von Mobile Mapping Punktwolken

Die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse zeigen, dass Genauigkeiten im Bereich weniger Millimeter bis Zentimeter eine Verbesserung der erfassten Punktwolken erfordern. In diesem Kapitel wird ein Ansatz zur Verbesserung von Mobile Mapping Punktwolken unter Verwendung hochgenauer Referenzdaten vorgestellt (Kapitel 6.1). Zusätzlich wird die Verteilung der benötigten Passpunkte diskutiert (Kapitel 6.2). Die durchgeführten Experimente zur Evaluation des Ansatzes werden anschließend in Kapitel 7 vorgestellt.

Für die Ausgleichung der Mobile Mapping Punktwolken des *RIEGL* VMX-250 wurde ein urbanes Gebiet mit Gebäuden und Bäumen entlang von breiten und schmalen Straßen ausgewählt. Die Umgebung erzeugt variable GNSS-Bedingungen durch Abschattung und Mehrwegeeffekte. Für das Testgebiet wurde ein hochgenaues Referenzpunktfeld vorhandener Objekte mittels Tachymeter erfasst. Die hohe Genauigkeit der Referenzpunkte wird durch das geodätische Referenznetz gewährleistet, welches speziell für das Testgebiet angelegt wurde. Punkte auf Fassaden dienen als Lage-Referenz, die Höhen-Referenz wird durch die Messung von Straßenprofilen realisiert. Die Referenzdaten liegen als Einzelpunkte vor, da sie mit einem Tachymeter erfasst wurden (Kapitel 4.2). Die Erfassung der Punktwolken mit zwei Scannern ist schematisch in Abb. 6.1 dargestellt. Die Distanz zwischen hochgenauen Referenzpunkten (grüne Kreuze) und der Punktwolke (punktierte, rote Linie) soll minimiert werden. Zur Reduzierung des Berechnungsaufwands wird die Trajektorie mit Hilfe von *Ankerpunkten* (blaue Dreiecke) in gleichmäßige Abschnitte unterteilt. Die Korrekturwerte zur Verbesserung der Trajektorie werden für diese Ankerpunkte geschätzt, zwischen den Ankerpunkten erfolgt eine lineare Interpolation der Korrekturen. Beobachtungen aus der Punktwolke wirken jeweils auf mehrere zeitlich und räumlich benachbarte Ankerpunkte, so wirkt z. B. der in Abb. 6.1 orange markierte Punkt über einen Scanner auf die beiden Ankerpunkte A_j und A_{j+1} und über den anderen Scanner auf A_j und A_{j-1} .

6.1. Ansatz zur Ausgleichung von Scanstreifen

Die Korrektur der Scanstreifen erfolgt mit dem Ziel, die Mobile Mapping Punktwolken optimal an die Referenzdaten anzupassen und den Einfluss der Positionierungsgenauigkeit zu verringern. In einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (MkQ) werden die Distanzen zwischen den Punktwolken und den tachymetrisch erfassten Referenzpunkten minimiert. Die Distanzen berechnen sich aus der orthogonalen Distanz jedes Referenzpunkts zur nächstgelegenen lokalen Oberfläche der Punktwolke. Zunächst wird der Scanpunkt mit der kürzesten euklidischen Distanz zum Referenzpunkt ermittelt und, mit Hilfe der benachbarten Scanpunkte, eine lokale Ebene zur Approximation der Oberfläche in diesem Punkt bestimmt. Diese lokale Ebene hat den Vorteil, dass die Distanz zwischen Referenzpunkt und Punktwolke mit höherer Genauigkeit ermittelt wird als bei einer Punkt-zu-Punkt-Zuordnung, da die erfassten Mobile Mapping Punkte

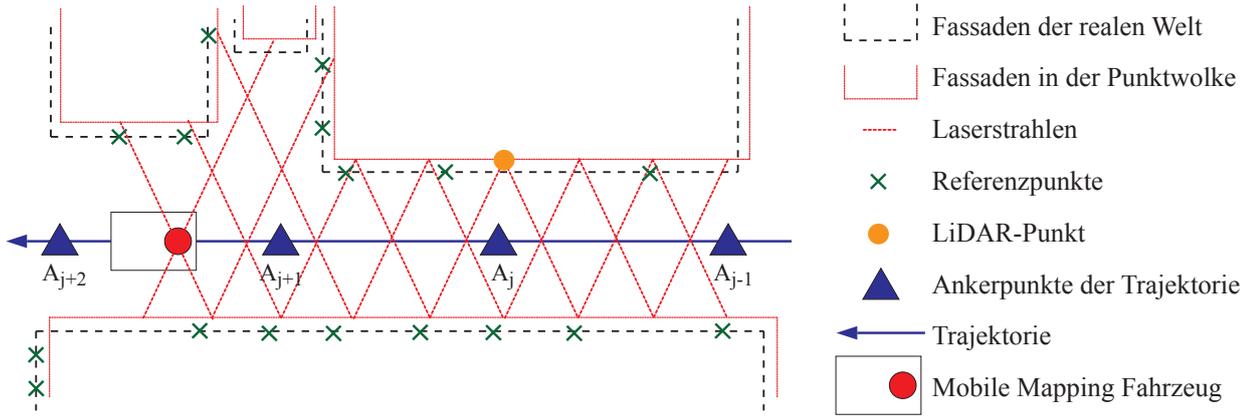


Abbildung 6.1.: Schema der Datenerfassung mit zwei Scannern entlang einer Trajektorie. Die Residuen zwischen Referenzdaten und Punktwolke werden in der Ausgleichung minimiert. Beobachtungen wirken auf zeitlich aufeinanderfolgende, benachbarte Ankerpunkte entlang der Trajektorie.

nicht identisch mit den korrespondierenden Referenzpunkten sind. Das Vorzeichen der Distanzen liefert zusätzlich die Information, ob die LiDAR-Punkte relativ zur Trajektorie vor oder hinter den Referenzpunkten liegen.

Beobachtungsgleichungen zur Ausgleichung der Scanstreifen

Eine starre, globale Transformation T ist aufgrund lokaler GNSS-Effekte zur Optimierung der Daten nicht ausreichend, daher muss eine lokale Anpassung der Punktwolken an die Referenzdaten zur Minimierung der Distanzen erfolgen. Die Modellierung der Transformation entlang der Trajektorie erfolgt daher für Ankerpunkte A_j , die auf der Trajektorie mit festen Abständen gewählt werden. In der Ausgleichung werden für jeden Ankerpunkt die Transformationsparameter \mathbf{T}_j mit einer Translation $\mathbf{t}_j = [t_x, t_y, t_z]$ und einer Rotation \mathbf{R}_j mit kleinen Winkeln ω, φ, κ geschätzt. Zwischen den Ankerpunkten wird die Korrektur linear interpoliert. Bei ausschließlicher Schätzung der Translation verbleiben systematische Restklaffungen in den Daten (Hofmann und Brenner, 2016). Die Korrespondenzen zwischen Referenzpunkten und Punktwolke wirken nur auf zeitlich und räumlich benachbarte Ankerpunkte und werden anhand der linearen Position des Mobile Mapping Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Messung den Ankerpunkten zugeordnet.

Die Sclangeometrie vor der Korrektur ist in Abb. 6.2 (a) dargestellt. Ausgehend von der aktuellen Position des Scankopfes \mathbf{p}_i liefert die polare Messung den Vektor \mathbf{r}_i zum Punkt \mathbf{q}_i der Punktwolke. Der lokale Normalenvektor \mathbf{n}_i definiert eine Ebene durch diesen Punkt, deren Abstand zu \mathbf{p}_{ref} minimiert werden soll.

Jede Korrespondenz zwischen einem Referenzpunkt und einer geschätzten Ebene der Oberfläche führt zu einer Beobachtungsgleichung

$$\begin{aligned} \mathbf{0} + \mathbf{v}_i &= \langle \mathbf{n}_i, \mathbf{p}_{ref} - (\mathbf{p}_i + \mathbf{t}_j + \mathbf{R}_j \mathbf{r}_i) \rangle \\ &= \langle \mathbf{n}_i, \mathbf{p}_{ref} - \mathbf{p}_i \rangle - \langle \mathbf{n}_i, \mathbf{t}_j \rangle - \langle \mathbf{n}_i, \mathbf{R}_j \mathbf{r}_i \rangle ; \sigma_{Dist}^2 \end{aligned} \quad (6.1)$$

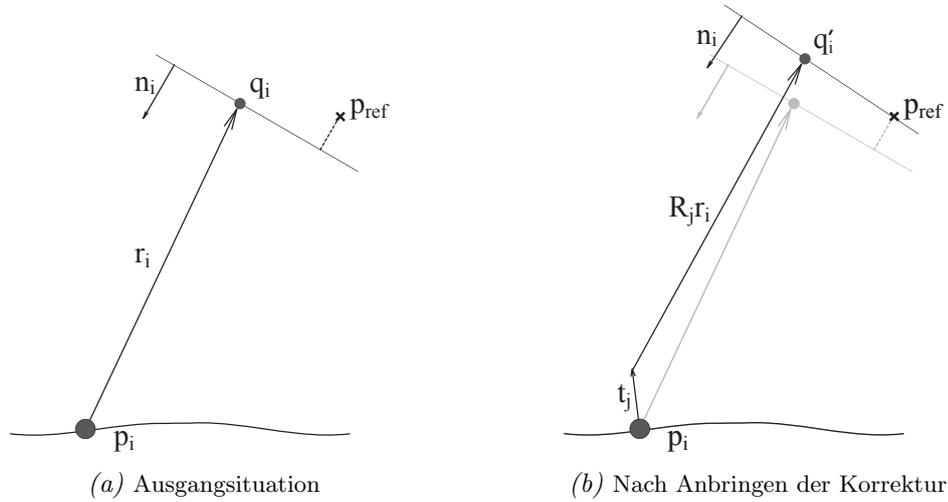


Abbildung 6.2.: Scangeometrie vor und nach der Korrektur.

mit der Verbesserung v_i . In die Beobachtungsgleichung gehen der Ursprung des Scankopfes \mathbf{p}_i , der polar gemessene Vektor zum Scanpunkt \mathbf{r}_i , der Normalenvektor der lokalen Ebene \mathbf{n}_i zur Approximation der Oberfläche und der Referenzpunkt \mathbf{p}_{ref} ein. Die zu schätzenden Unbekannten der Transformation \mathbf{T}_j enthalten den Verschiebungsvektor \mathbf{t}_j und die Rotationsmatrix \mathbf{R}_j der drei zu schätzenden Winkel ω , φ , κ . Jede Punkt-zu-Ebene-Korrespondenz liefert genau eine Gleichung. Das Skalarprodukt berechnet hierbei die gewünschte vorzeichenbehaftete Distanz von \mathbf{p}_{ref} zur lokalen Ebene, in Richtung des Normalenvektors \mathbf{n}_i . Als Varianz σ_{Dist}^2 wird die Genauigkeit der Distanz angesetzt. Die Situation nach der Korrektur ist in Abb. 6.2 (b) zu sehen. Die Anwendung der geschätzten Korrektur \mathbf{T}_j , mit einer Translation \mathbf{t}_j und einer Rotation \mathbf{R}_j , auf den Messvektor \mathbf{r}_i minimiert den Abstand zu \mathbf{p}_{ref} . Die Geometrie vor der Korrektur ist zusätzlich in grau hinterlegt, \mathbf{p}_{ref} bleibt als Referenzpunkt in der Ausgleichung unverändert.

Zusätzliche Bedingungen

Die Einführung von Ankerpunkten zur abschnittswiseen Korrektur der Trajektorie mit lokalen \mathbf{T}_j führt zur Singularität des Ausgleichungsmodells, wenn nicht genügend Beobachtungen vorliegen. Dieser Fall tritt z. B. auf, wenn sich in der Nähe der Ankerpunkte kein Straßenprofil zur Bestimmung der z-Richtung in den Referenzdaten befindet oder wenn alle sichtbaren Fassaden dieselbe Orientierung aufweisen. Mit zusätzlichen Beobachtungsgleichungen für die Transformation als beobachtete Unbekannte wird eine weiche Bedingung zur Vermeidung der Singularität für jeden beobachteten Ankerpunkt eingeführt:

$$\mathbf{0} + \mathbf{v} = \mathbf{T}_j ; \Sigma_{Prior}. \quad (6.2)$$

Die Varianzen in Σ_{Prior} können aus der Genauigkeit der Positionslösung des GNSS/INS-Systems abgeleitet werden. In den Experimenten wurde in der Ausgleichung jedoch ein geringes Gewicht für diese Beobachtungen gewählt, sodass die Degeneration des Modells verhindert wird.

Als weitere Bedingung wird im Ausgleichungsmodell die Annahme genutzt, dass die Trajektorie lokal glatt verläuft. Veränderungen in der lokalen Nachbarschaft der Ankerpunkte können daher als begrenzt angenommen werden, da die Ankerpunkte mit einem Abstand von 2,50 m entlang der Trajektorie gewählt wurden. In der Ausgleichung wird dies mit der zusätzlichen Beobachtungsgleichung

$$\mathbf{0} + \mathbf{v} = \mathbf{T}_j - \mathbf{T}_{j-1} ; \Sigma_{Glatt} \quad (6.3)$$

formuliert, die für aufeinanderfolgende beobachtete Ankerpunkte angesetzt wird. Dies bedeutet, dass die geschätzten Verbesserungen an den Ankerpunkten A_{j-1} sowie A_{j+1} (Abb. 6.1) einen Einfluss auf den Ankerpunkt A_j haben. Umgekehrt wären die Ankerpunkte A_{j-1} und A_{j+1} vollkommen unabhängig voneinander, wenn dem Ankerpunkt A_j keine Beobachtungen aus der Punktwolke (nach Gl. (6.1)) zugeordnet wurden. Der Einfluss dieser Bedingung wird ebenfalls über die Wahl des Gewichts in der Ausgleichung gesteuert.

Schätzung der Parameter

Die Translationen \mathbf{t}_j und Rotation \mathbf{R}_j werden für alle Ankerpunkte simultan in einer Ausgleichung geschätzt. Aus Gl. (6.1) ergibt sich (Indizes werden im Folgenden zur Vereinfachung der Schreibweise weggelassen):

$$\langle \mathbf{n}, \mathbf{p}_{ref} - \mathbf{p} \rangle - \mathbf{v} = \langle \mathbf{n}, \mathbf{t} \rangle + \langle \mathbf{n}, \mathbf{R}\mathbf{r} \rangle. \quad (6.4)$$

Wird \mathbf{R} als Rotation um kleine Winkel angesetzt, gilt

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \mathbf{S}_{\omega\varphi\kappa}, \quad (6.5)$$

wobei \mathbf{I} die Identitätsmatrix und $\mathbf{S}_{\omega\varphi\kappa}$ die schiefsymmetrische Matrix

$$\mathbf{S}_{\omega\varphi\kappa} := \begin{bmatrix} 0 & -\kappa & \varphi \\ \kappa & 0 & -\omega \\ -\varphi & \omega & 0 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

darstellt. Daraus folgt mit Gl. (6.4)

$$\langle \mathbf{n}, \mathbf{p}_{ref} - \mathbf{p} \rangle - \mathbf{v} = \langle \mathbf{n}, \mathbf{t} \rangle + \langle \mathbf{n}, \mathbf{r} \rangle + \langle \mathbf{n}, \mathbf{S}_{\omega\varphi\kappa}\mathbf{r} \rangle \quad (6.7)$$

bzw.

$$\langle \mathbf{n}, \mathbf{p}_{ref} - (\mathbf{p} + \mathbf{r}) \rangle - \mathbf{v} = \langle \mathbf{n}, \mathbf{t} \rangle + \langle \mathbf{n}, \mathbf{S}_{\omega\varphi\kappa}\mathbf{r} \rangle. \quad (6.8)$$

Die linke Seite $\langle \mathbf{n}, \mathbf{p}_{ref} - (\mathbf{p} + \mathbf{r}) \rangle$ in Gl. (6.8) ist daher der vorzeichenbehaftete Abstand des Punkts \mathbf{p}_{ref} von der lokalen Ebene vor Anwendung der Korrektur (Abb. 6.2 a). Die rechte Seite ist linear in den Unbekannten $t_x, t_y, t_z, \omega, \varphi$ und κ . Aus ihr ergeben sich die Elemente der Designmatrix \mathbf{A} : Für die Translation ergeben sich aufgrund von $\langle \mathbf{n}, \mathbf{t} \rangle$ die Elemente $[n_x, n_y, n_z]$, d. h. der lokale Normalenvektor.

Für die Rotation folgt aus

$$\langle \mathbf{n}, \mathbf{S}_{\omega\varphi\kappa}\mathbf{r} \rangle = \mathbf{n}^T \mathbf{S}_{\omega\varphi\kappa} \mathbf{r}, \quad (6.9)$$

aufgrund der Eigenschaft $\mathbf{S}_u \mathbf{v} = \mathbf{S}_v^T \mathbf{u}$, die für jede schiefsymmetrische Matrix gilt:

$$\mathbf{n}^T \mathbf{S}_{\omega\varphi\kappa} \mathbf{r} = \mathbf{n}^T \mathbf{S}_r^T \begin{bmatrix} \omega \\ \varphi \\ \kappa \end{bmatrix}. \quad (6.10)$$

Damit ergeben sich hier die Elemente von \mathbf{A} zu

$$\mathbf{n}^T \mathbf{S}_r^T = [n_x, n_y, n_z] \begin{bmatrix} 0 & r_z & -r_y \\ -r_z & 0 & r_x \\ r_y & -r_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (6.11)$$

oder explizit:

$$[-n_y r_z + n_z r_y, n_x r_z - n_z r_x, -n_x r_y + n_y r_x].$$

Aus Gl. (6.2) folgen sechs einzelne Beobachtungsgleichungen für t_x , t_y , t_z , ω , φ und κ . Diese werden für jeden Ankerpunkt angesetzt, der Bestandteil mindestens einer Beobachtungsgleichung nach Gl. (6.1) ist. Gl. (6.3) führt ebenfalls zu jeweils sechs Einzelgleichungen, welche Bedingungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ankerpunkten aufstellen.

Die Ausgleichung wird nach Gauß-Markov durchgeführt. Aus dem funktionalen Modell

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{x}, \quad (6.12)$$

ergibt sich unter Berücksichtigung des stochastischen Modells der Lösungsvektor $\hat{\mathbf{x}}$ für die Unbekannten

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}. \quad (6.13)$$

Aus den Beobachtungsgleichungen ergibt sich für die Normalgleichungsmatrix ein Aufbau in 6x6-Blöcken mit Bandstruktur, wodurch die Lösung von Gl. (6.13) sehr effizient möglich ist, etwa durch eine Cholesky-Zerlegung, die eine einzige Vorwärts/Rückwärts-Prozessierung erfordert. Abb. 6.3 zeigt das Layout einer Normalgleichungsmatrix für den (theoretischen) Fall, dass Beobachtungen für die Ankerpunkte A_0 , A_1 , A_2 , A_3 , A_6 , A_7 und A_8 vorliegen. Aufgrund der Unterbrechung nach A_3 werden zwischen A_3 und A_6 keine Glattheitsbedingungen aufgestellt.

Für jeden Ankerpunkt A_j enthält $\hat{\mathbf{x}}$ sechs Korrekturwerte, die mit $\hat{\mathbf{x}}_j = [\hat{t}_{x,j}, \hat{t}_{y,j}, \hat{t}_{z,j}, \hat{\omega}_j, \hat{\varphi}_j, \hat{\kappa}_j]^T$ bezeichnet werden. Zwischen zwei Ankerpunkten werden die in der Ausgleichung geschätzten Korrekturwerte linear in Abhängigkeit des Abstands zu den beiden benachbarten Ankerpunkten interpoliert. Der Faktor λ zur Interpolation ergibt sich aus

$$\lambda = \frac{a - a_{j-1}}{a_j - a_{j-1}}, \quad (6.14)$$

wobei a_j sowie a_{j-1} die lineare Position der beiden benachbarten Ankerpunkte entlang der Trajektorie angeben, also z. B. 15,0 m und 12,5 m, für die Korrekturwerte in der Ausgleichung geschätzt

Für die Experimente in Kapitel 7 wurden die folgenden Standardabweichungen für Σ_{ll} angenommen:

- Für die Distanz zur Ebene, Gl. (6.1): 2 cm.
- Zur Fixierung der Ankerpunkte, Gl. (6.2): 10 m (Position) und 10° (Winkel). Die Ankerpunkte werden damit weich festgehalten.
- Als Glattheitsbedingung zwischen aufeinanderfolgenden Ankerpunkten, Gl. (6.3): 1 cm (Positionsänderung) und $0,02^\circ$ (Winkeländerung) bei einer Ankerdistanz von 2,5 m.

Die Gewichtsmatrix P ergibt sich aus Gl. (6.16) mit

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1}. \quad (6.17)$$

Damit liefert die Ausgleichung die Kofaktormatrix der ausgeglichenen Parameter mit

$$\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}. \quad (6.18)$$

Die Elemente der Hauptdiagonale von $\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}}$ werden in Kapitel 7 zur Angabe der Fehlerbänder (z. B. Abb. 7.6) genutzt.

Da das Modell linear ist, erfordert die Ausgleichung keine Iterationen. Allerdings basiert Gl. (6.1) auf der Zuordnung von Referenzpunkten zu Scanpunkten, die sich nach der Schätzung der Transformationsparameter \mathbf{T}_j aller Ankerpunkte A_j verändern. Wie beim Standard-ICP-Algorithmus (Kapitel 2.7) erfolgt daher die Ausgleichung iterativ, wobei nach jeder Neuschätzung der Transformationen neue Korrespondenzen etabliert werden. Um die Ausgleichung zu robustifizieren, werden hierbei nur Korrespondenzen innerhalb einer Maximaldistanz von den Referenzpunkten zu den Scandaten berücksichtigt. Für die in Kapitel 7 durchgeführten Experimente wird diese Distanz schrittweise von 0,3 m bis auf 5 cm verringert. Insgesamt werden 10 Iterationen mit der Abfolge (in Metern): [0,3 0,3 0,3 0,2 0,2 0,1 0,1 0,05 0,05 0,05] durchgeführt. Dadurch werden Fehlzuordnungen wirksam reduziert. Referenzpunkte, deren Abstand oberhalb des jeweiligen Distanz-Schwellenwerts liegt, werden als Ausreißer markiert und in Kapitel 7 entsprechend dargestellt (z. B. Abb. 7.9).

6.2. Auswahl geeigneter Referenzpunkte

Die Erfassung von Mobile Mapping Punktwolken unterscheidet sich in einigen Bereichen von der Erfassung von LiDAR-Punktwolken mit einem Flugzeug. Während flugzeugbasierte Systeme in der Regel direkte Sicht zu den GNSS-Satelliten haben und Fehlereinflüsse, wie Cycle Slips, vor allem an den Randbereichen in engen Kurven auftreten, befindet sich das Mobile Mapping Fahrzeug in einem häufigen Wechsel zwischen freier Sicht zu ausreichend vielen Satelliten und dem Ausfall der Signale aufgrund von Verdeckungen durch Gebäude, Brücken oder Vegetation. Lokale Effekte innerhalb einzelner Straßen können aufgrund von Mehrwegeeffekten und der unregelmäßigen Abschattung der Signale auftreten. Geringe Geschwindigkeiten des Fahrzeugs, die die Unsicherheit der INS-Messung erhöhen, treten ebenfalls bei terrestrischen Systemen auf, während Flugzeuge mit nahezu konstanter Geschwindigkeit und ohne Hindernisse und Ampeln Daten aufzeichnen. Zudem ist

eine streifenförmige Erfassung der Projektgebiete mit einer Querüberlappung entlang der Streifen aufgrund der Straßengeometrie und -topologie nicht möglich. Eine Überlappung der Punktwolken kann nur an Straßenkreuzungen und bei mehrfacher Erfassung derselben Straße erreicht werden. Eine direkte Übertragung der Empfehlungen zur Wahl von Passpunkten im Projektgebiet aus dem Bereich der flugzeuggetragenen Geodatenerfassung ist daher nicht möglich, wenn keine dichte Erfassung der Punktwolken in Kombination mit einer Gesamtausgleichung und Verknüpfung zwischen den Punktwolken stattfindet.

Bei der Wahl der Referenzpunkte muss ein Kompromiss zwischen der Wirtschaftlichkeit bei der Bereitstellung von Referenzdaten und der gewünschten Genauigkeit der Punktwolken erzielt werden. Der Eingriff in die erfasste Umgebung soll weiterhin so gering wie möglich ausfallen, auf spezielle Zielmarken oder Zielobjekte wurde daher in den Experimenten verzichtet. Daraus ergibt sich allerdings das Problem, dass in der realen Welt keine „idealen“ Referenzobjekte, z. B. Kugeln oder L-förmige freistehende Quader, als natürliche oder existierende anthropogene Objekte vorhanden sind. In städtischen Bereichen finden sich vorrangig Ebenen, die jedoch zwei Freiheitsgrade aufweisen, sodass mehrere Objekte pro Position erforderlich sind (vgl. dazu die von Kager (2004) genannten Patches). Eine schematische Darstellung zur möglichen Verteilung von Passobjekten bei Mobile Mapping Daten zeigt Abb. 6.4. Diese berücksichtigt, dass jeder Referenzpunkt nur eine 1D-Information liefert, sodass Lage- und Höhenreferenzpunkte jeweils als Gruppe auftreten. Bei der Auswahl und Verteilung der Referenzpunkte sollten zudem die lokalen Einflüsse auf die GNSS-Signale berücksichtigt werden, sodass Straßen mit hoher Abschattung mehr Passobjekte erhalten als Straßen mit freier Sicht zu den Satelliten. Im folgenden Kapitel werden systematische Experimente zur Anzahl und Verteilung von Passpunkten durchgeführt.

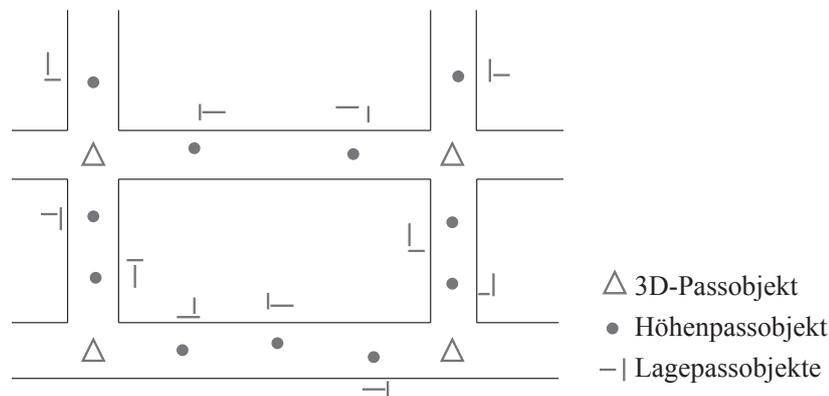


Abbildung 6.4.: Schema zur Verteilung von Passobjekten für Mobile Mapping Projekte.

7. Experimente und Evaluation zur streifenbasierten Ausgleichung

Dieses Kapitel beschreibt die durchgeführten Experimente zur Evaluation der streifenbasierten Ausgleichung und den Einfluss der Verteilung von Passpunkten auf die erreichte Genauigkeit. Für die Evaluation stehen 150 Mobile Mapping Scanstreifen zur Verfügung (Abb. 7.1), für die im mittleren Bereich tachymetrisch erfasste Referenzdaten (Kapitel 4.2) vorliegen. Die Punktwolken wurden mit dem Mobile Mapping System *RIEGL VMX-250* (Kapitel 2.5 und 2.6) in 75 Epochen im Zeitraum zwischen Juli 2012 und August 2013 an insgesamt fünf Tagen aufgezeichnet. In jeder Epoche liegen zwei Datensätze als Scanstreifen vor, die simultan von den beiden Scannern erfasst wurden. Die Referenzdaten wurden Ende 2015 aufgenommen, sodass Unterschiede zwischen der Referenz und den Punktwolken aufgrund von Baustellen oder Renovierungsarbeiten möglich sind. Eine Straßenbaustelle im Testgebiet während der Aufnahme der Referenzpunkte lässt Differenzen erwarten.



Abbildung 7.1.: Trajektorien im Testgebiet zur Auswertung mit Referenzdaten. Gelb: Trajektorien von 150 Scanstreifen. Rot: Trajektorie der ausgewählten Epoche zur detaillierten Evaluation. (Orthophoto und Gebäude: LGLN)

Die folgenden Experimente werden für das gewählte Testgebiet (Abb. 7.1) durchgeführt, Abb. 7.2 zeigt schematisch die Anordnung der Referenzdaten:

1. Ausgleichung mit allen Referenzpunkten, Abb. 7.2 (a): Dieses Experiment nutzt alle Referenzpunkte als Passpunkte zur Ausgleichung von jeweils zwei simultan erfassten Punktwolken der Scanner, die aufgrund der werksseitigen Kalibrierung bereits eine gute relative Genauig-

keit aufweisen. Das Experiment liefert Aussagen zum Potential der Ausgleichung und stellt die Referenz für die folgenden Experimente mit weniger Passpunkten dar.

2. Reduzierte Anzahl der Referenzpunkte, Abb. 7.2 (b): Für die Ausgleichung der Trajektorienpunkte werden 75%, 50% oder 25% der Referenzpunkte als Passpunkte genutzt, die Reduzierung erfolgt gleichmäßig über das gesamte Testgebiet. Die verbleibenden Referenzpunkte werden als Kontrollpunkte zur Evaluation verwendet. Es wird analysiert, wie dicht Referenzpunkte vorliegen müssen, um gute Genauigkeiten in der Ausgleichung zu erreichen.
3. Referenzpunkten in einem regelmäßigen Raster, Abb. 7.2 (c): Die Referenzpunkte werden rasterförmig ausgedünnt, sodass in Zellen mit einer Ausdehnung von $20 \times 20 \text{ m}^2$ Passpunkte auf Fassaden in den Daten verbleiben. Die Straßenprofile wurden zur Hälfte in der Ausgleichung genutzt, die übrigen Referenzpunkte dienen der Kontrolle.
4. Referenzpunkte an Kreuzungen, Abb. 7.2 (d): Dieses Experiment nutzt in der Ausgleichung Passpunkte ausschließlich an Kreuzungen, um zu untersuchen, wie gut die Korrektur der Trajektorie zwischen den Passpunkten interpoliert werden kann. Die ungenutzten Referenzpunkte innerhalb der Straßen werden als Kontrollpunkte zur Evaluation verwendet.

Detaillierte Ergebnisse der Experimente werden exemplarisch für eine Epoche vorgestellt (Abb. 7.1, rote Trajektorie). Die beiden Scanstreifen wurden entlang einer 140 m langen Trajektorie aufgenommen, die in Nord-Süd-Richtung in der Mitte des Testgebiets im nördlichen Teil bis zur zentralen Kreuzung verläuft. Die Fahrbahn hat eine Breite von 6,0 m, der Abstand zwischen den Fassaden beträgt etwa 24 m. Die Gebäude haben eine Traufhöhe (Firsthöhe) zwischen 10 m (15 m) und 16 m (19 m). Entlang der Straße stehen zudem insgesamt 19 Bäume, davon 12 auf der östlichen Straßenseite und 7 auf der westlichen. Die Bäume waren zum Zeitpunkt der Aufnahme belaubt und haben einen Kronendurchmesser von jeweils 8-9 m, sie überdecken die Straße damit auf einer Breite von bis zu 17 m nahezu über die gesamte Länge des Scanstreifens.

Die korrigierten Trajektorien der Experimente 2, 3 und 4 werden mit den Ergebnissen mit vollständigen Referenzdaten (Experiment 1) verglichen, um die Interpolation zu bewerten. Das Ergebnis der Analysen liefert für alle Experimente eine Aussage über die absolute Genauigkeit der Punktwolken vor und nach der Ausgleichung und ermöglicht eine Empfehlung zur Verteilung der Passpunkte.

7.1. Ausgleichung der Scanstreifen mit vollständiger Referenz

In diesem Experiment erfolgt die Ausgleichung der Scanstreifen paarweise in jeder Epoche mit allen verfügbaren Referenzpunkten als Passpunkte (Abb. 7.2 a) zur Minimierung der Residuen. Das Verfahren liefert Aussagen für die Bereiche der Punktwolke, in denen Passpunkte zugeordnet werden konnten. Für Abschnitte ohne Referenzpunkte ist keine Aussage über die Genauigkeit möglich. Die Ergebnisse für eine einzelne Epoche beziehen sich auf den in Abb. 7.1 dargestellten Abschnitt. Grafische Ergebnisse für eine weitere Epoche sind in Anhang B dargestellt. Eine Zusammenfassung der Ausgleichung mit vollständigen Referenzdaten für alle ausgewerteten Epochen ist am Ende des Abschnitts enthalten.

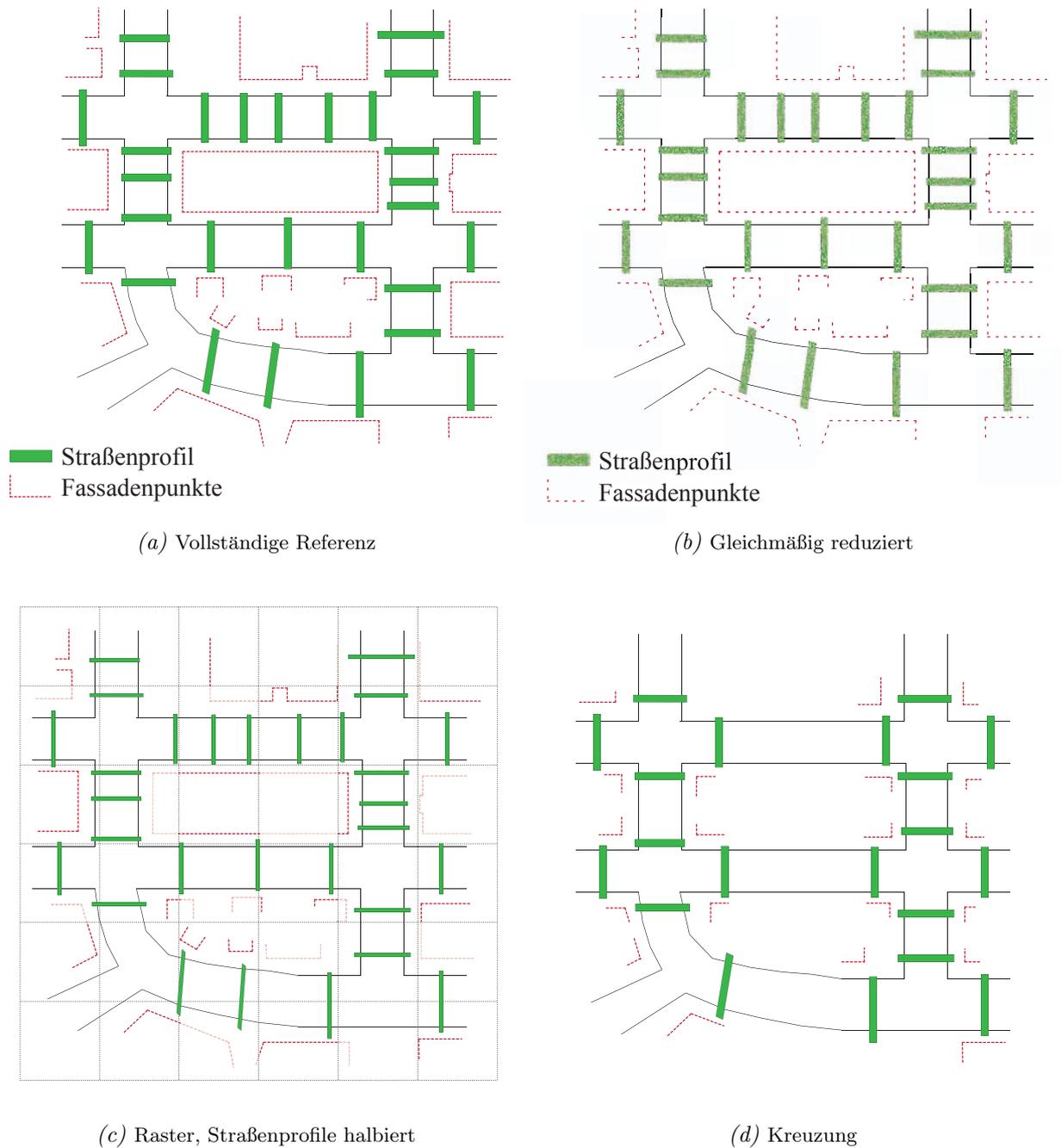


Abbildung 7.2.: Schematische Verteilung der Referenzdaten im ausgewählten Testgebiet.

Ergebnisse vor der Ausgleichung

In den Scanstreifen sind insgesamt 1549 Referenzpunkte im Scanstreifen 1 (Scanner 1, S1) und 1328 Referenzpunkte im Scanstreifen 2 (S2) sichtbar. Davon werden 1524 (S1) bzw. 1284 Punkte (S2) für die Ausgleichung genutzt. Die berechneten Residuen zwischen Referenzdaten und Mobile Mapping Punktwolke für die analysierte Epoche sind als Histogramme in Abb. 7.3 getrennt für Scanstreifen 1 (a) und 2 (b) dargestellt. Der Mittelwert der Verteilung liegt bei $-19,5\text{ mm}$ (S1) bzw. $-27,2\text{ mm}$ (S2) mit einer Standardabweichung von $17,7\text{ mm}$ (S1) bzw. $14,8\text{ mm}$ (S2). Eine

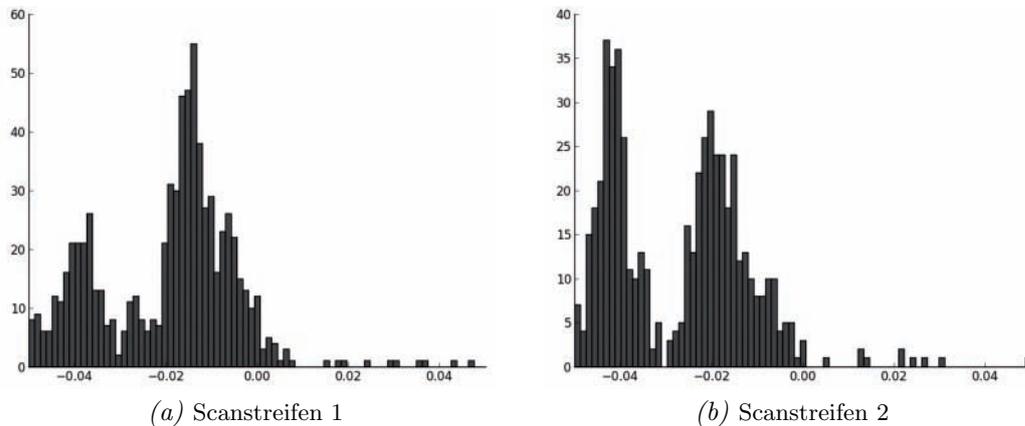


Abbildung 7.3.: Histogramme der Residuen für vollständige Referenzdaten in einer Epoche vor Ausgleichung der Trajektorie, Residuen beschränkt auf -5 cm bis +5 cm.

Trennung der Residuen nach ihrer Normalenrichtung (x, y oder z) erfolgt nicht. Dies erklärt die beiden lokalen Maxima in den Residuen bei etwa -20 mm und -40 mm, wobei ein lokales Maximum die Residuen der Höhe und das andere die Residuen der Lage repräsentiert.

Die Residuen zwischen der Punktwolke und den korrespondierenden Referenzpunkten werden in den Scanstreifen visualisiert. Abb. 7.4 zeigt die Residuen von -5 cm in blau über 0 cm in grün bis +5 cm in rot („Hue“-Farbskala) für Scanstreifen 1 (a) und 2 (b), vor der Ausgleichung. Negative Residuen bedeuten, dass der Referenzpunkt vom Mobile Mapping System aus hinter der Punktwolke liegt, bei positiven Residuen liegen die Referenzpunkte davor. Eine Verschiebung der Punktwolke gegenüber den Referenzdaten in der Lage zeigt sich durch rote Punkte auf einer und blaue Punkte auf der gegenüberliegenden Straßenseite. Höhenabweichungen werden durch die Residuen an den Punkten der Straßenprofile der Referenz, quer zur Straßenmittelachse, sichtbar. Die Notwendigkeit lokaler Transformationsparameter entlang der Trajektorie verdeutlicht Abb. 7.4 mit einem Farbverlauf der Straßenprofile von cyan nach blau. Die Residuen zwischen Referenz und Punktwolke sind für die 140 m lange Trajektorie nicht stabil, sondern verändern sich von etwa -1 cm im Süden (cyan, links im Bild) nach ≤ -5 cm im Norden (blau, rechts im Bild).

Eine Analyse der Residuen getrennt nach Lage und Höhe erfolgt nach Abb. 7.5 anhand der ermittelten Abweichungen vor der Ausgleichung entlang der linearen Positionen der Trajektorie, jeweils für die x-, y- und z-Komponente der Vektoren. Der Residuenvektor berechnet sich jeweils aus der Distanz zwischen Referenzpunkt und lokaler Oberfläche sowie der Normale dieser Ebene. Das Ergebnis wird an der Position des Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Erfassung dargestellt. Für die Korrektur der Trajektorie ist nur der Anteil der Residuen interessant, der in Richtung der Oberflächennormalen der Punktwolke wirkt. Ein Punkt auf der Fassade liefert, abhängig von der Orientierung der Fassade im Raum, eine Verschiebung in der Lage (Werte abweichend von Null in Abb. 7.5, oben für die x-Richtung), jedoch keinen Anteil für die Höhe (Punkte auf der Null-Linie in Abb. 7.5 unten, z-Richtung). Für Punkte auf der Straße gilt der umgekehrte Fall, diese liefern nur einen Anteil für die Höhe (z), jedoch keinen Anteil für die Lage (x oder y).

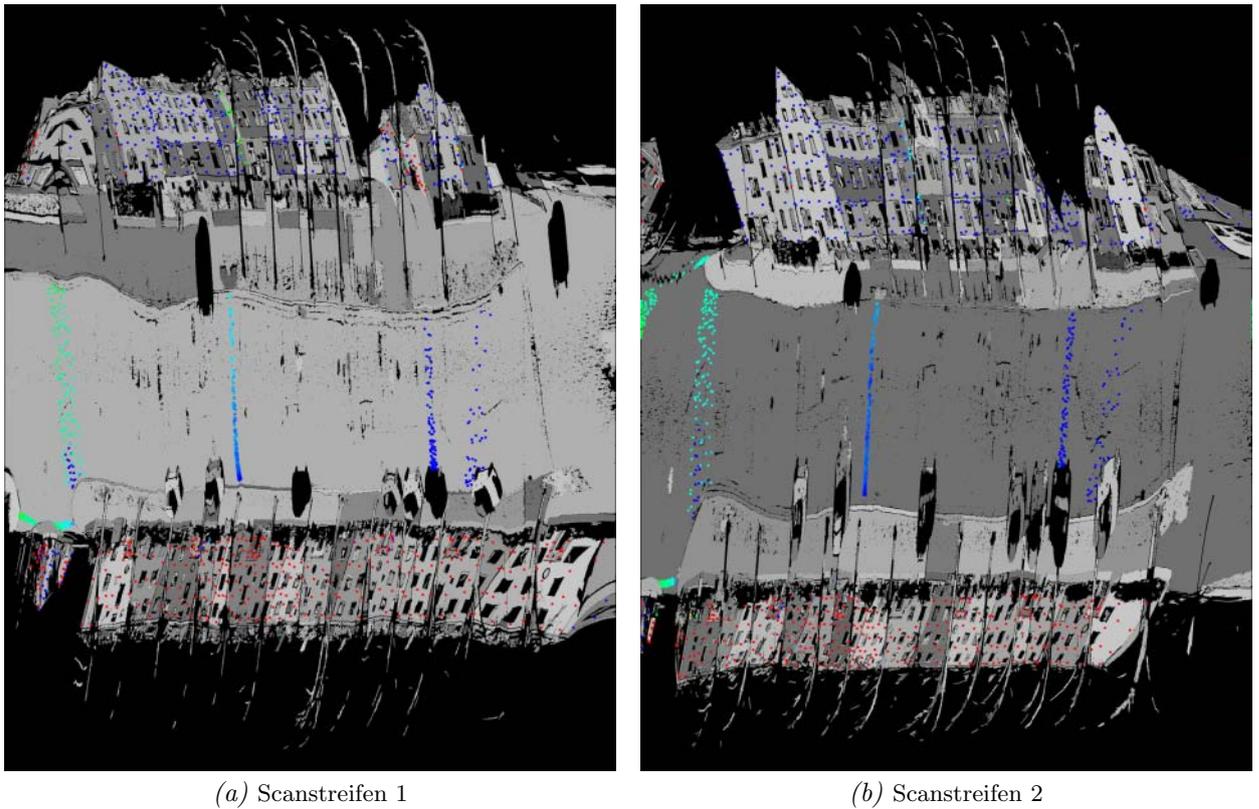


Abbildung 7.4.: Farbcodierte Residuen mit vollständigen Referenzdaten für die Scanstreifen einer Epoche vor der Ausgleichung der Trajektorie (blau = -5 cm, grün = 0 cm, rot = +5 cm). Verlauf der Straße in Nord-Süd-Richtung, Fahrt von Süden (links im Bild) nach Norden (rechts).

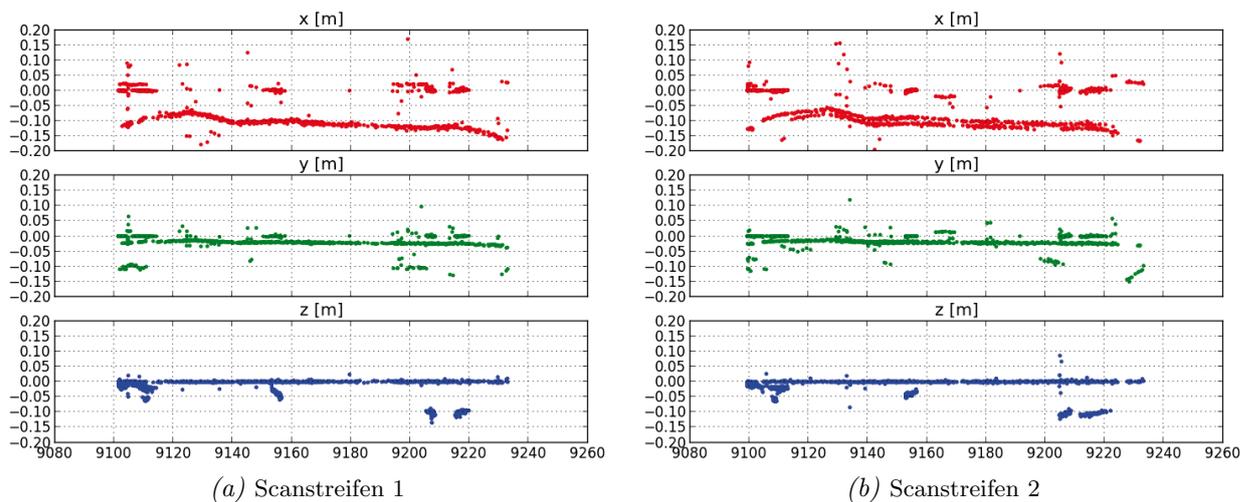


Abbildung 7.5.: Residuen zwischen vollständigen Referenzdaten und Scanstreifen einer Epoche vor der Ausgleichung, getrennt für die x -, y - und z -Komponente der Normalenvektoren.

Ergebnisse nach der Ausgleichung

Abb. 7.6 zeigt das Ergebnis der Ausgleichung für die Translation (links) und die drei Drehwinkel (rechts) entlang der Trajektorie. Die Genauigkeit der geschätzten Parameter wird als 1σ -Band (rot,

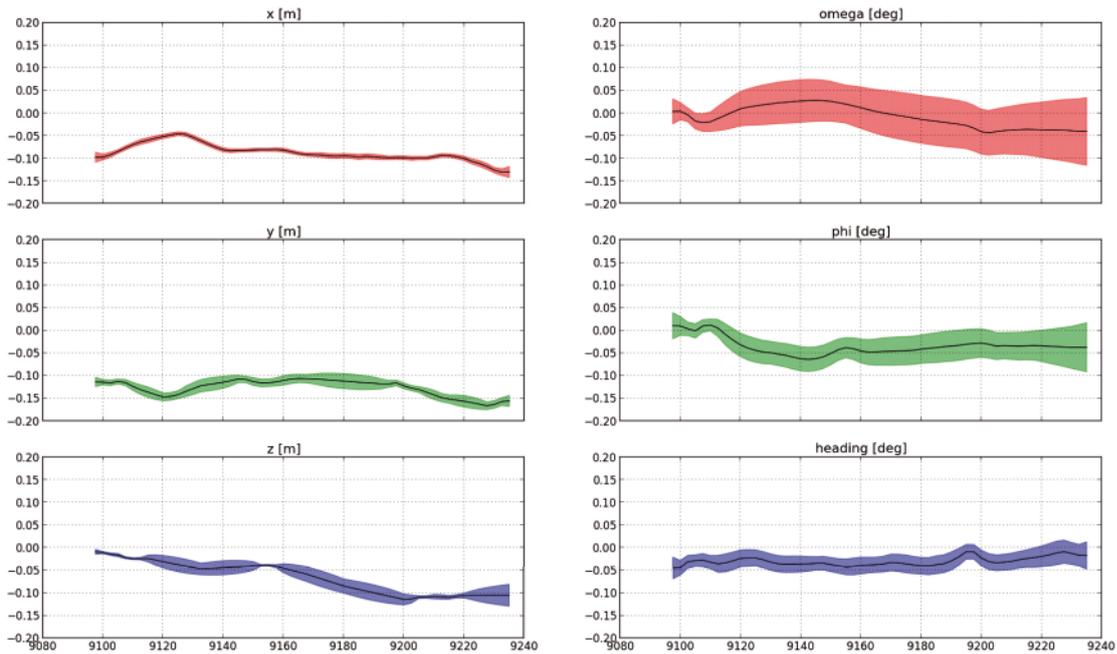


Abbildung 7.6.: Ergebnis der Ausgleichung mit vollständiger Referenz für die Ankerpunkte entlang der linearen Trajektorie [in m] für die Translationen (links) und Rotationen (rechts). Verlauf der Straße in Nord-Süd-Richtung.

grün, blau) nach Gl. (6.18) um den berechneten Mittelwert angegeben. Liegen Beobachtungen für eine Position auf der Trajektorie vor, wird das Band an dieser Stelle schmaler. Der Straßenverlauf in Nord-Süd-Richtung mit Fassaden parallel zur Straße bietet entlang der Trajektorie viele Beobachtungen in x-Richtung, die die Trajektorie stützen. Das breitere Band in y-Richtung resultiert daraus, dass es weniger Fassadenelemente orthogonal zur Fahrtrichtung gibt und damit weniger Beobachtungen mit Normalenrichtung parallel zur Trajektorie. Diese Richtung ist daher in dieser Epoche weniger gut bestimmt. In der z-Komponente wird die Standardabweichung durch die Referenzpunkte der Straßenprofile verbessert, daher ist das blaue Band an der Position der Straßenprofile schmaler.

Abb. 7.7 zeigt die Histogramme der Residuen in der analysierten Epoche für Scanstreifen 1 (a) und 2 (b) nach der Ausgleichung der Trajektorie. Der Mittelwert der Residuen liegt bei -0,3 mm (Scanner 1) und -2,2 mm (Scanner 2) mit einer Standardabweichung von 6,0 mm (Scanner 1) und 5,7 mm (Scanner 2). Dies entspricht der Messgenauigkeit der Scanner. Bei etwa -3 cm sind im Histogramm verbleibende Residuen erkennbar.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 7.1 unter Scan 1 und Scan 2. Die Zeile „Matching“ enthält alle Punkte, die der Mobile Mapping Punktwolke zugeordnet wurden. In der Ausgleichung werden nur die zugeordneten Punkte verwendet, deren Distanz zur Punktwolke unterhalb des festgelegten Schwellenwerts liegt. Die Anzahl findet sich in der Zeile „Beobachtungen“. Die Verteilung der Residuen wird durch den Mittelwert μ und die Standardabweichung σ beschrieben. Die Verbesserung durch die Ausgleichung zeigt sich auch in der Anzahl der zugeordneten Beobachtungen, die nach der Ausgleichung nahezu den Matching-Kandidaten entspricht.

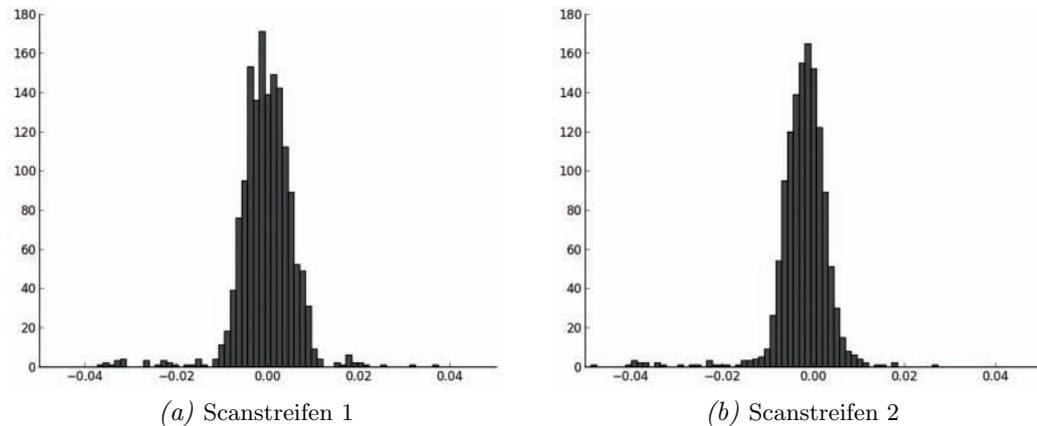


Abbildung 7.7.: Residuen zwischen den vollständigen Referenzdaten und Scanstreifen einer Epoche nach Ausgleichung der Trajektorie, zwischen -5 cm und $+5\text{ cm}$.

Die Residuen der Referenzpunkte nach der Ausgleichung getrennt für die drei Komponenten x , y und z sind in Abb. 7.8 dargestellt. In der Ausgleichung der Scanstreifen wurden die Residuen minimiert und liegen nun um 0 cm . Punkte mit einer Abweichung von $> |5\text{ cm}|$ nach der Ausgleichung, repräsentieren die detektierten Ausreißer. Für die Höhe (z) verbleiben geringere Abweichungen am Beginn der Trajektorie etwa bei Position 9110, sichtbar als Punktgruppe unterhalb der Null-Linie.

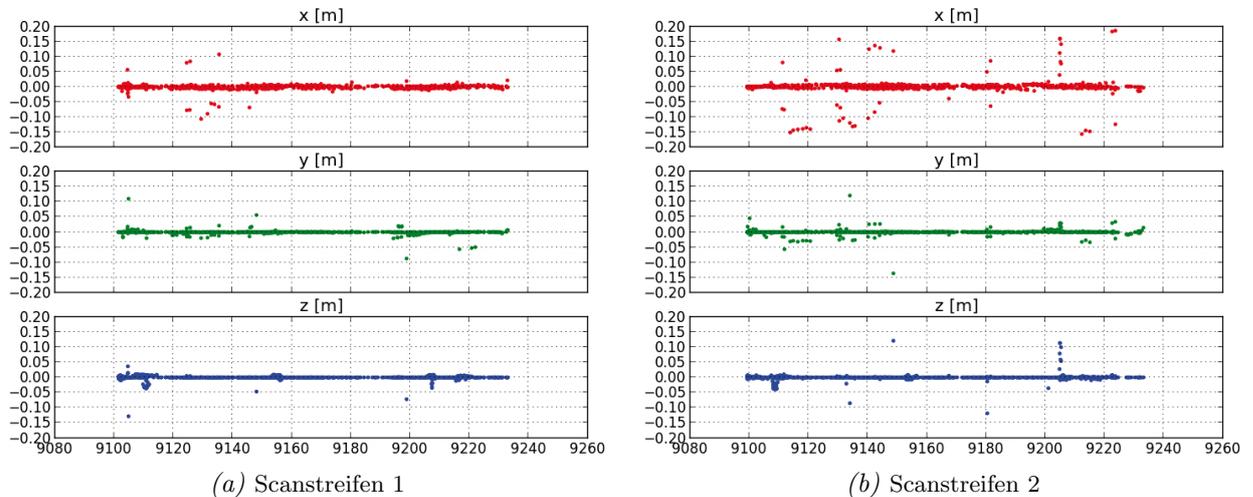


Abbildung 7.8.: Residuen zwischen Referenzdaten und Scanstreifen nach Ausgleichung der Trajektorie, getrennt für x -, y - und z -Komponente.

Im Vergleich zu den Ergebnissen vor der Ausgleichung (Abb. 7.4), minimiert die korrigierte Trajektorie die Residuen, erkennbar an den mehrheitlich grünen Punkten (0 cm) in Abb. 7.9. Ausreißer finden sich vor allem auf Kanten der Fassaden und resultieren aus fehlerhaften Korrespondenzen zu einer geschätzten Ebene, wenn die tatsächlich korrespondierende Fläche im Scanstreifen nicht sichtbar ist. Detektierte Ausreißer sind magenta eingefärbt und werden eliminiert. An einigen Referenzpunkten auf der Straße bleiben in einem begrenzten Bereich Differenzen von wenigen Zentimetern nach der Ausgleichung erhalten. Diese sind in Abb. 7.9 links im Bild an den blauen Punkten im grünen Straßenprofil erkennbar und erzeugen die Abweichungen in der z -Komponente

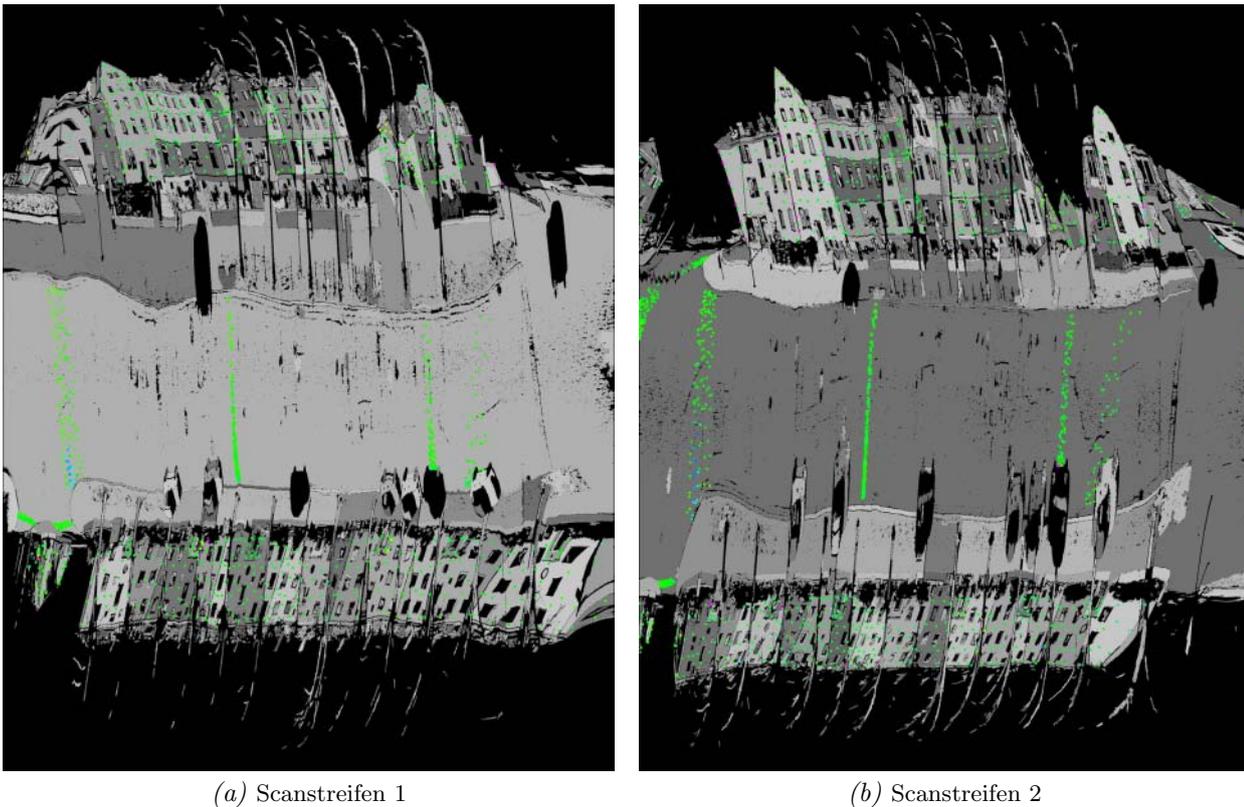


Abbildung 7.9.: Residuen zwischen den vollständigen Referenzdaten und Scanstreifen einer Epoche nach Ausgleichung der Trajektorie (blau = -5 cm, grün = 0 cm, rot = +5 cm, magenta: detektierte Ausreißer). Verlauf der Straße in Nord-Süd-Richtung.

an Position 9110. Sie werden durch Straßenbauarbeiten verursacht, die im Zeitraum zwischen der Erfassung der Mobile Mapping Punktwolken und der Referenzdaten erfolgten.

Ergebnisse für 150 Scanstreifen

Die Ergebnisse der Ausgleichung für alle 150 analysierten Scanstreifen wurden mit 65.658 Beobachtungen in der ersten Iteration und 152.885 Beobachtungen in der letzten Iteration berechnet. Für zwei Scanstreifen lieferte der Algorithmus kein Ergebnis, da keine Korrespondenzen mit der Referenz gefunden wurden. Punktwolken mit wenigen zugeordneten Referenzpunkten wurden Großteils außerhalb des Testgebiets erfasst. In etwa einem Drittel der Punktwolken finden sich weniger als 500 korrespondierende Referenzpunkte, ein weiteres Drittel enthält zwischen 500 und 1000 Referenzpunkte, die übrigen Punktwolken enthalten zwischen 1000 und 4000 Referenzpunkte. Die Residuen zwischen Referenzdaten und Punktwolken sind in Abb. 7.10 als Histogramm vor (a) und nach der Ausgleichung (b) für alle Scanstreifen gemeinsam dargestellt. Der berechnete Mittelwert über alle Epochen beträgt vor der Ausgleichung -13 mm mit einer Standardabweichung von 24 mm. Der Mittelwert nach der Ausgleichung liegt bei -0,6 mm mit einer Standardabweichung von 5,5 mm. Eine Zusammenfassung findet sich in Tabelle 7.1 (alle).

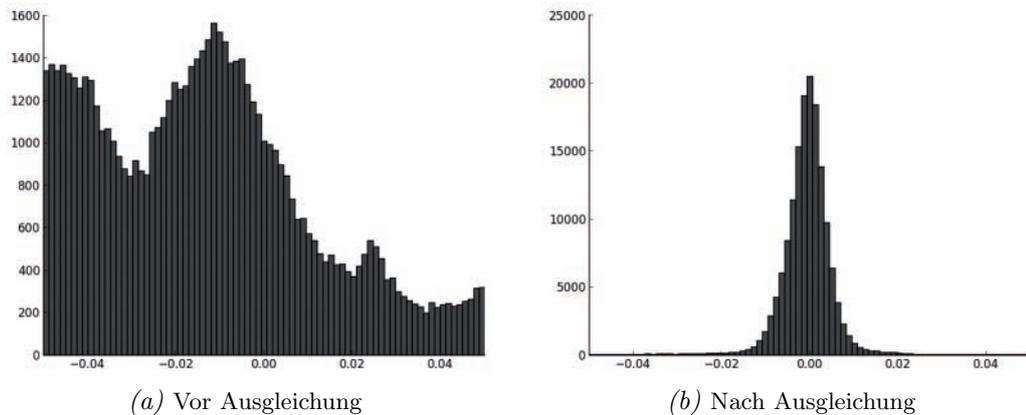


Abbildung 7.10.: Histogramme der Residuen für 150 Scanstreifen, für den Bereich -5 cm bis $+5\text{ cm}$.

Tabelle 7.1.: Ergebnisse für vollständige Referenzpunkte vor und nach der Ausgleichung, für eine Epoche (Scan 1 und Scan 2) sowie für alle Scanstreifen. Matching: Referenzpunkte im Scanstreifen, Beobachtung: In der Ausgleichung genutzte Beobachtungen, μ , σ : Mittelwert und Standardabweichung der Verteilung der Residuen.

	vor der Ausgleichung			nach der Ausgleichung		
	Scan 1	Scan 2	alle	Scan 1	Scan 2	alle
Matching	1549	1313	153.369	1543	1328	155.748
Beobachtungen	746	557	65.658	1524	1284	152.885
μ [mm]	-19,6	-27,2	-13,0	-0,3	-2,2	-0,6
σ [mm]	14,7	14,8	24,1	6,0	5,7	5,5

7.2. Ergebnisse mit gleichmäßig reduzierten Referenzpunkten

In diesem Experiment wird die Anzahl der Referenzpunkte für die Ausgleichung gleichmäßig reduziert und das Ergebnis mit den verbleibenden Referenzpunkten kontrolliert (Abb. 7.2 b). Es wird untersucht, wie gut die Verbesserung der Daten mit einer geringeren Anzahl von Referenzpunkten möglich ist. Das Referenzpunktfeld wird gleichmäßig auf 75%, 50% oder 25% der Gesamtpunkte reduziert und die Ausgleichung mit weniger Punkten durchgeführt. Die in der Ausgleichung verwendeten Referenzpunkte werden im folgenden Text als Passpunkte bezeichnet, die übrigen Punkte gehen als Kontrollpunkte in die Auswertung ein.

Die Ergebnisse vor der Ausgleichung unter Verwendung von 75%, 50% oder 25% der Referenz als Passpunkte sind in Abb. 7.11 (a) bis (c) für 145 ausgewertete Scanstreifen dargestellt. Fünf Scanstreifen konnten aufgrund einer zu geringen Passpunktanzahl nach der Reduzierung nicht analysiert werden. Die Ergebnisse der Kontrollpunkte finden sich in den Abb. 7.11 (d) bis (f). Die Histogramme weisen eine große Ähnlichkeit, sowohl untereinander als auch mit Abb. 7.10 (a) bei Verwendung aller Referenzpunkte, auf. Systematische Einflüsse auf die Ergebnisse aufgrund der Trennung in Pass- und Kontrollpunkte können daher ausgeschlossen werden.

Die geschätzten Verbesserungen für die Translation und die Winkel mit 75% und 25% der Referenzpunkte sind in Abb. 7.12 für die bekannte Epoche dargestellt. Die Verteilung der Passpunkte und

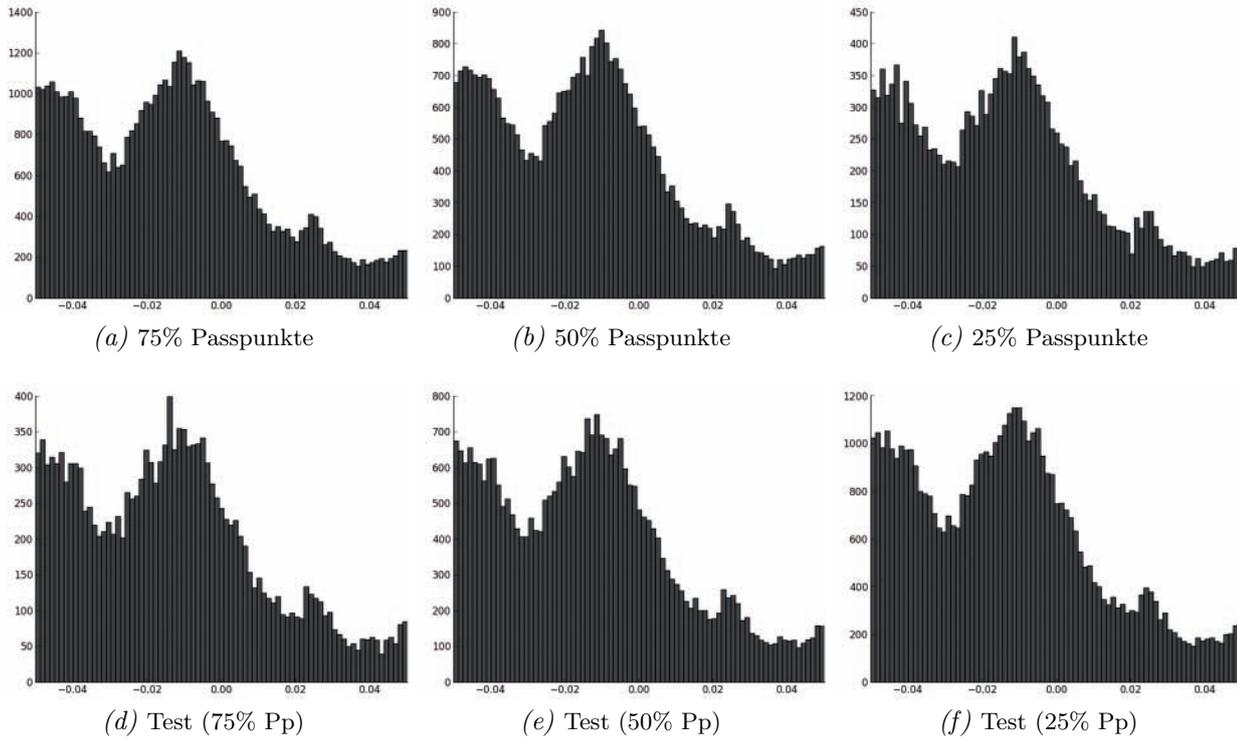


Abbildung 7.11.: Histogramme der Residuen vor der Ausgleichung für 145 Scanstreifen mit gleichmäßig reduziertem Referenzpunktfeld (von -5 cm bis +5 cm).

der Kontrollpunkte vor der Ausgleichung zeigt Abb. C.1. Die Passpunkte sind für beide Datensätze gleichmäßig entlang der linearen Trajektorie verteilt, sodass die Verbesserungen über die gesamte Trajektorie geschätzt werden können. Die Kontrollpunkte sind ebenfalls gleichmäßig verteilt. Die Verbesserungen verhalten sich auch bei einer geringeren Passpunktanzahl, wie nach Abb. 7.6 erwartet. Die Reduzierung führt allerdings zu einer Verbreiterung des 1σ -Bands.

Anhand der Verteilung der Pass- und Kontrollpunkte nach der Ausgleichung kann die Auswirkung der Verbesserungen auf die Trajektorie analysiert werden. Die Kontrollpunkte in Abb. C.2 für

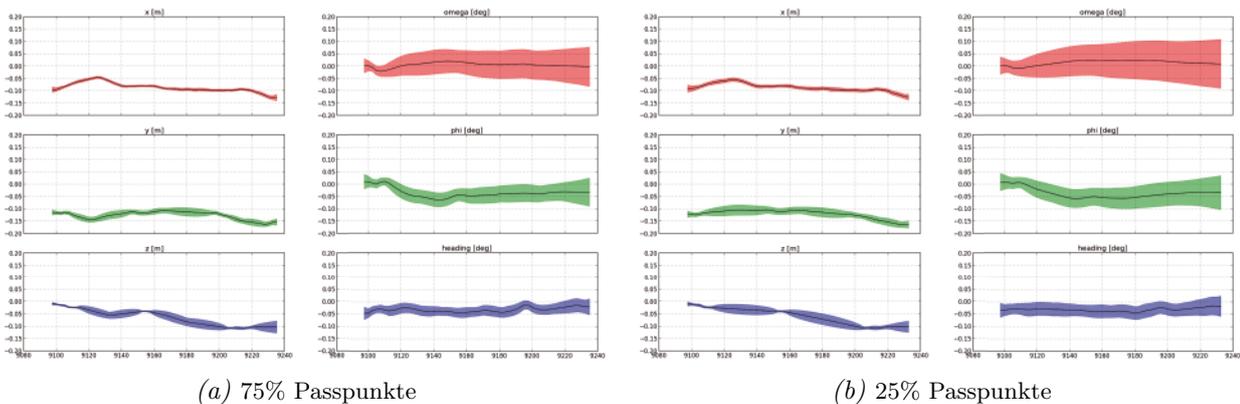


Abbildung 7.12.: Ergebnis der Ausgleichung der Ankerpunkte entlang der linearen Trajektorie [in m] für drei Translationen (links) und drei Rotationen (rechts) für unterschiedlich stark reduzierte Referenzdaten.

75% (c) und 25% (d) der Referenzpunkte zeigen eine ähnliche Verteilung der Punkte entlang der Trajektorie wie die Passpunkte in (a) und (b). Die geschätzte Korrektur der Trajektorie wirkt folglich in gleichem Maß auf die Kontrollpunkte wie auf die Passpunkte. Die Residuen nach der Ausgleichung sind in den Histogrammen in Abb. 7.13 dargestellt. Die Histogramme (a) bis (c) enthalten die Ergebnisse der Passpunkte, (d) bis (f) die zugehörigen Kontrollpunkte. Die Verteilung der Residuen nach der Ausgleichung weist für Pass- und Kontrollpunkte eine große Ähnlichkeit auf.

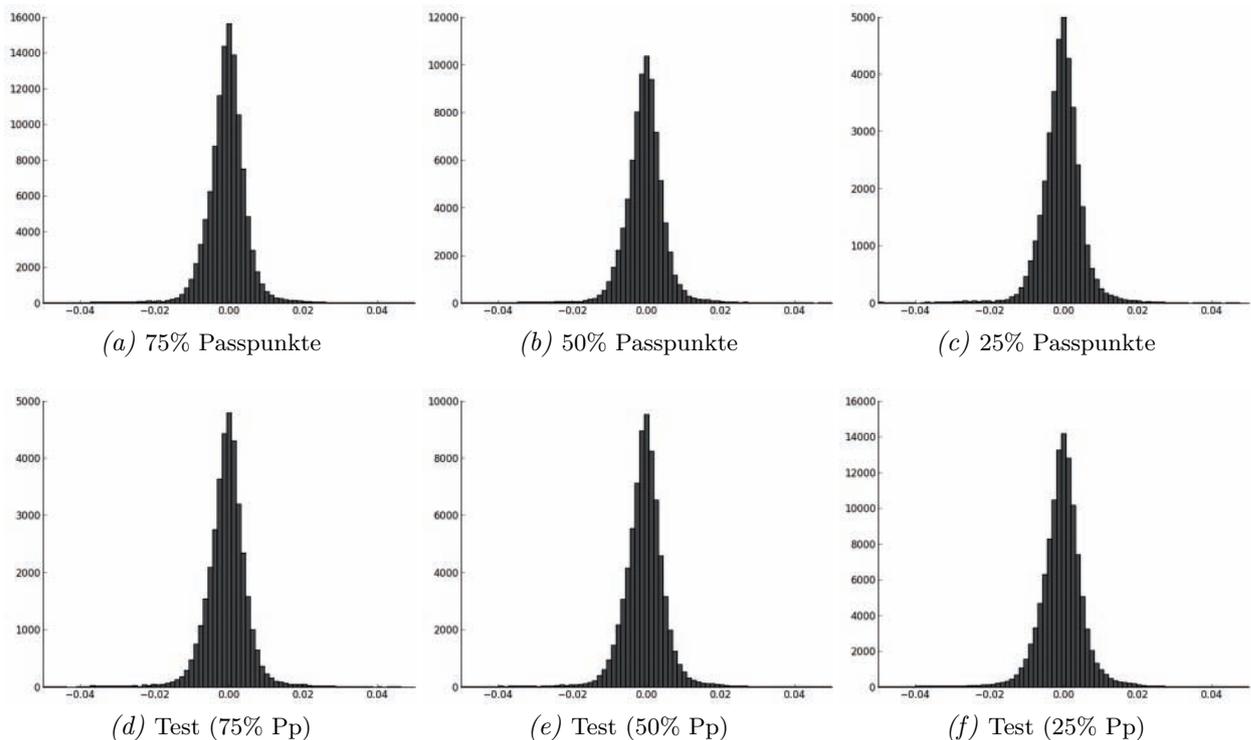


Abbildung 7.13.: Histogramme der Residuen für alle Scanstreifen mit gleichmäßig reduziertem Referenzpunktfeld nach der Ausgleichung (von -5 cm bis +5 cm).

Tabelle 7.2 fasst die Ergebnisse der 145 ausgewerteten Scanstreifen für 75%, 50% und 25% der Referenzpunkte zusammen. Alle Ergebnisse sind getrennt für Passpunkte („Pp“) und Kontrollpunkte („Test“) angegeben. Die Verteilung der Residuen vor der Ausgleichung weist keine Unterschiede zwischen Pass- und Kontrollpunkten auf (vgl. mit Abb. 7.11). Die Verteilung der Residuen nach der Ausgleichung zeigt ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen Pass- und Kontrollpunkten. Eine Reduzierung der Punkte hat daher keinen negativen Einfluss auf die Ergebnisse.

Im Anhang (Abb. C.3) sind die Residuen für das Experiment mit 25% der Referenzpunkte direkt im Scanstreifen der bekannten Epoche dargestellt. Die Pass- (a) und die Kontrollpunkte (c) zeigen vor der Ausgleichung ein ähnliches Verhalten für die Residuen. Die Abweichungen der Passpunkte werden in der Ausgleichung minimiert (b). Nach der Ausgleichung zeigen auch die Kontrollpunkte (d) überall minimierte Residuen.

Tabelle 7.2.: Ergebnisse für Pass- (P_p) und Kontrollpunkte ($Test$) mit gleichmäßig reduzierten Referenzpunkten, vor und nach der Ausgleichung für 145 Scanstreifen.

		vor der Ausgleichung			nach der Ausgleichung		
		75%	50%	25%	75%	50%	25%
Matching	P_p	116.367	79.353	38.307	118.188	80.563	38.858
	$Test$	37.003	74.017	115.063	37.522	75.128	116.802
Beobachtungen	P_p	50.130	34.657	16.366	116.055	79.097	38.133
	$Test$	15.586	31.132	49.295	37.013	73.713	114.454
μ [mm]	P_p	-13,0	-13,0	-12,8	-0,6	-0,6	-0,6
	$Test$	-12,9	-13,0	-13,1	-0,7	-0,7	-0,6
σ [mm]	P_p	24,1	24,1	24,1	5,5	5,6	5,7
	$Test$	24,2	24,2	24,1	5,7	5,8	6,2

7.3. Ergebnisse mit Referenzpunkten in einem Raster

Dieses Experiment untersucht die Ergebnisse der Ausgleichung bei Verwendung von Referenzpunkten in einem gleichmäßigen Raster von $20 \times 20 \text{ m}^2$ über das gesamte Testgebiet (Abb. 7.2 c). Innerhalb des Rasters enthält jede zweite Zelle die Referenzpunkte der Fassaden als Passpunkte, Referenzpunkte in den benachbarten Zellen werden als Kontrollpunkte genutzt. Die Straßenprofile werden quer zur Straße geteilt, wobei ein Teil als Passpunkte und der andere Teil zur Kontrolle dient.

Die Residuen mit 20 m-Raster sind als Histogramme in Abb. 7.14 für die Passpunkte (a, b) sowie die Kontrollpunkte (c, d) vor und nach der Ausgleichung dargestellt. Die Verteilung vor der Ausgleichung ist für Pass- und Kontrollpunkte ähnlich. Die Aufteilung der Daten in Pass- und Kontrollpunkte erzeugt entsprechend keinen systematischen Fehler. Der Mittelwert der Verteilung der Residuen liegt für die Passpunkte und auch die Kontrollpunkte nach der Ausgleichung nahe Null, die Kontrollpunkte weisen jedoch eine größere Standardabweichung von 9,4 mm auf. Im Vergleich dazu haben die Residuen der Passpunkte eine Standardabweichung von 5,4 mm, welche aus der Scannergenauigkeit resultiert (Tabelle 7.3).

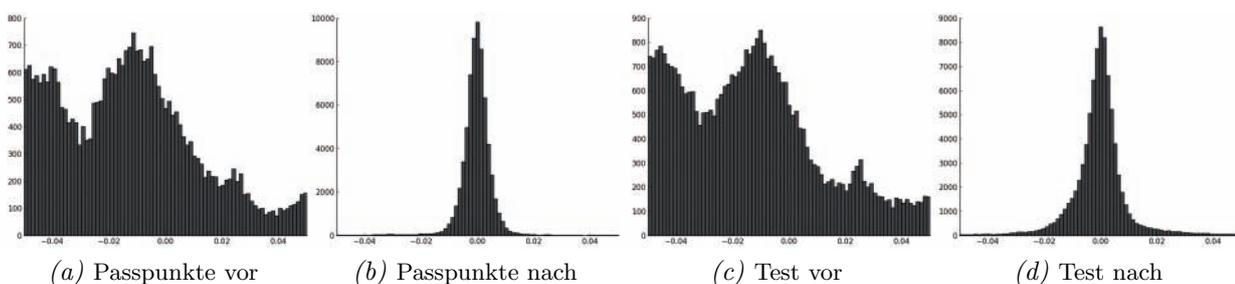


Abbildung 7.14.: Histogramme der Residuen für 145 Scanstreifen mit 20 m-Raster, zwischen -5 cm und +5 cm.

Tabelle 7.3.: Ergebnisse für Referenzpunkte in einem 20 m-Raster vor und nach der Ausgleichung, für Pass- („Pp“) und Kontrollpunkte („Test“) in 145 ausgewerteten Scanstreifen.

	vor der Ausgleichung		nach der Ausgleichung	
	Pp	Test	Pp	Test
Matching	67.420	85.951	68.494	87.066
Beobachtungen	30.272	35.390	67.449	83.200
μ [mm]	-12,7	-13,2	-0,5	-0,5
σ [mm]	23,8	24,4	5,4	9,4

Die berechneten Korrekturwerte entlang der Trajektorie sind für das ausgewertete 20 m-Raster in Abb. 7.15 für den bereits bekannten Scanstreifen dargestellt. Während die Korrektur der Translation gut bestimmt ist (schmales Band für die Unsicherheit), zeigen die Winkel große Unsicherheiten. Die Korrektur des Headings zeigt zudem eine Schwingung mit einer halben Wellenlänge von etwa 20 m. Dieser Effekt wird möglicherweise durch die abwechselnd angeordneten Passpunkte auf gegenüberliegenden Fassaden hervorgerufen.

In Abb. C.4 (a) ist zusätzlich die Verteilung der Passpunkte entlang der Trajektorie dargestellt. Beobachtungen für die Lage finden sich etwa in gleichen Abständen entlang der Trajektorie. Die ermittelte größere Standardabweichung in den Kontrolldaten ist in Abb. C.4 (d) in den Residuen für die x-Richtung erkennbar. Während die Beobachtungen der Passpunkte nach der Ausgleichung (Abb. C.4 b) auf der horizontalen Null-Achse verlaufen, zeigen die Kontrollpunkte eine Streuung um die Null-Achse. Abb. C.5 zeigt ergänzend die Residuen vor und nach der Ausgleichung für Pass- und Kontrollpunkte direkt im Scanstreifen der bekannten Epoche.

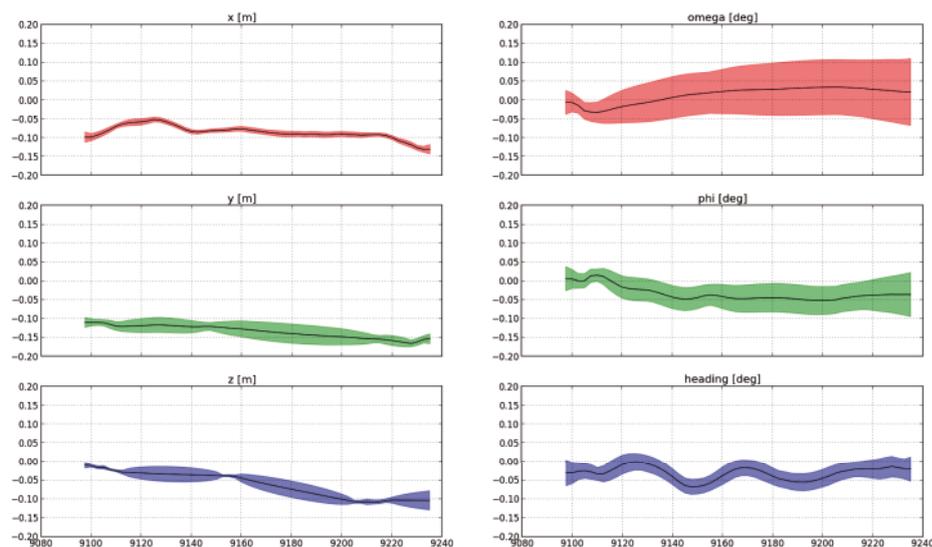


Abbildung 7.15.: Ergebnis der Ausgleichung der Ankerpunkte entlang der linearen Trajektorie [in m] für drei Translationen (links) und drei Rotationen (rechts) mit Passpunkten in einem 20 m-Raster.

7.4. Ergebnisse mit Referenzpunkten an Kreuzungen

In diesem Experiment werden für die Ausgleichung nur Passpunkte an Straßenkreuzungen genutzt (Abb. 7.2 d). Die Punkte innerhalb der Straßen werden als Kontrollpunkte verwendet. Von den 150 vorhandenen Scanstreifen wurden in diesem Experiment nur 100 Scanstreifen ausgewertet, da die übrigen Datensätze entweder keine Pass- oder keine Kontrollpunkte enthalten. Die Ergebnisse werden im Folgenden detailliert an dem bereits bekannten Scanstreifen dargestellt. Eine Übersicht der Ergebnisse für alle ausgewerteten Daten findet sich am Ende des Abschnitts.

Die Residuen vor der Ausgleichung sind für die Pass- und Kontrollpunkte ähnlich (Abb. 7.16, getrennt für Pass- (a) und Kontrollpunkte (b) dargestellt). Die Differenz in der Höhe ist links im Bild kleiner als rechts, erkennbar im Farbverlauf in den Straßenprofilen von cyan (-1 cm ... -2 cm) nach dunkelblau (≤ -5 cm). Eine Verschiebung in der Lage wird durch die blauen (oben) und roten Pixel (unten) auf den gegenüberliegenden Fassaden sichtbar (a). Die Kontrollpunkte weisen ein ähnliches Verhalten auf (b).

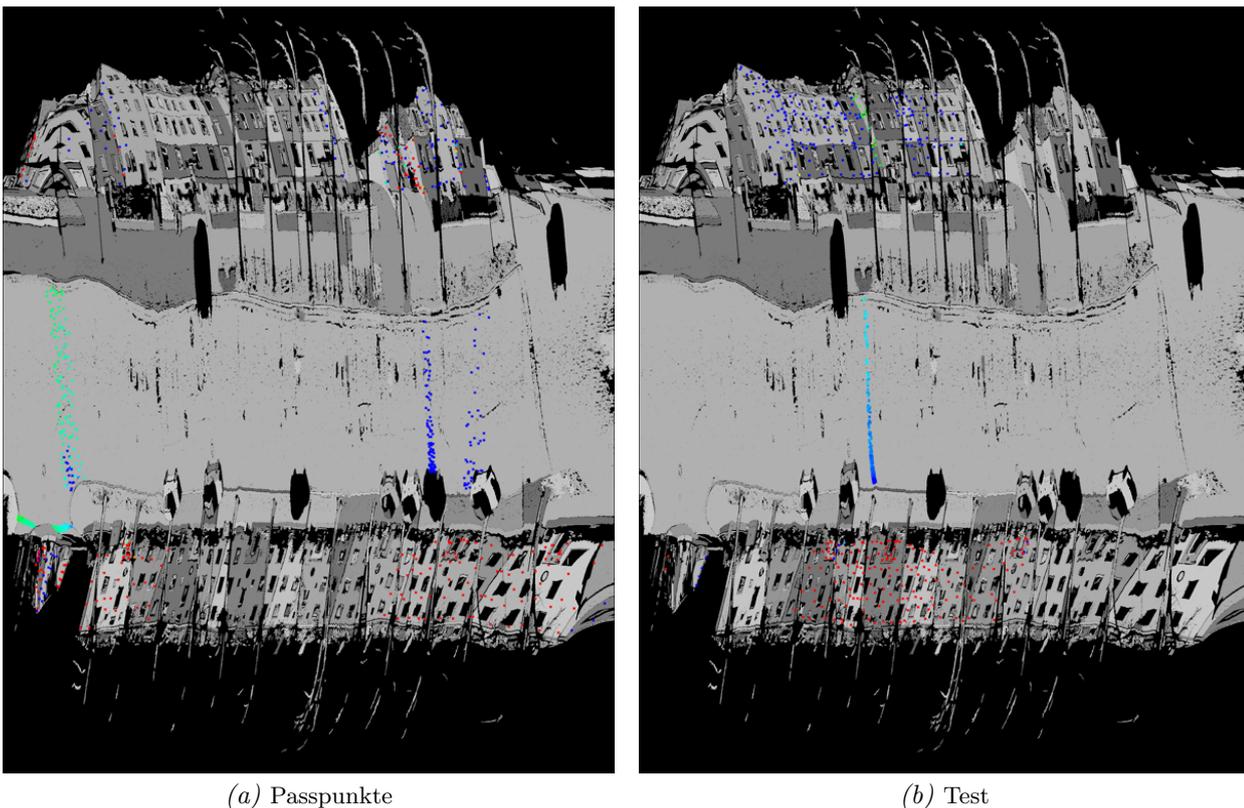


Abbildung 7.16.: Farbcodierte Residuen vor der Ausgleichung für einen Scanstreifen mit Passpunkten an Kreuzungen (blau = -5 cm, grün = 0 cm, rot = +5 cm).

Quantitative Ergebnisse für die beiden Scanstreifen sind in Tabelle 7.4 aufgeführt, jeweils für die Passpunkte („Passpkt“) und die Kontrollpunkte („Test“). Im Vergleich dazu sind die Ergebnisse unter Verwendung aller Referenzpunkte („alle“) angegeben. Die Ausgleichung der Punktwolken verbessert den Mittelwert der Residuen für Scanstreifen 1 (Scanstreifen 2) von -12,4 mm (-16,6 mm) auf 0,0 mm (-1,7 mm), die Standardabweichung liegt mit 6,7 mm (6,6 mm) in der Größenordnung

Tabelle 7.4.: Ergebnisse für Referenzpunkte an Kreuzungen vor und nach der Ausgleichung, getrennt nach Pass- (Passpkt) und Kontrollpunkten (Test) für einen ausgewählten Scanstreifen (jeweils Scanstreifen 1 links, 2 rechts). Vergleich mit Ergebnissen für alle Referenzpunkte (alle).

	vor der Ausgleichung						nach der Ausgleichung					
	Passpkt		Test		alle		Passpkt		Test		alle	
Matching	949	715	600	598	1246	1313	946	730	596	598	1543	1328
Beobachtungen	510	291	236	266	746	557	935	701	556	578	1524	1284
μ [mm]	-12,4	-16,6	-35,1	-38,7	-19,6	-27,2	0,0	-1,7	16,2	16,0	-0,3	-2,2
σ [mm]	8,1	8,9	13,9	10,8	14,7	14,8	6,7	6,6	24,9	24,8	6,0	5,7

der Genauigkeit der Scanner. Dies entspricht dem Ergebnis bei Verwendung aller Referenzpunkte. Die Kontrollpunkte zeigen ein ungünstigeres Verhalten. Der Mittelwert der Verteilung der Residuen verbessert sich von -35,1 mm (-38,7 mm) nur auf 16,2 mm (16,0 mm), die Standardabweichung der Verteilung steigt von 13,9 mm (10,8 mm) auf 24,9 mm (24,8 mm).

Die zugehörigen Histogramme enthält Abb. 7.17 (a) bis (d) für die Passpunkte und (e) bis (h) für die Kontrollpunkte. Die Passpunkte weisen die erwartete Verteilung auf. Die Kontrolldaten zeigen dagegen nach der Ausgleichung zwei lokale Maxima, welche vor der Ausgleichung nicht erkennbar waren. Die Verwendung von Passpunkten ausschließlich an Kreuzungen führt in diesem Beispiel dazu, dass die Genauigkeit der Punktwolken innerhalb der Straßen abnimmt und nach der Ausgleichung größere Residuen auftreten als vorher.

Die Verteilung der Beobachtungen entlang der Trajektorie zeigt Abb. C.6 für die Passpunkte (a und b) und für die Kontrollpunkte (c und d). Der lineare Trajektorien-Abschnitt (in Metern) zwischen den Positionen 9140 und 9200, unterbrochen durch wenige Beobachtungen um Position 9180, weist

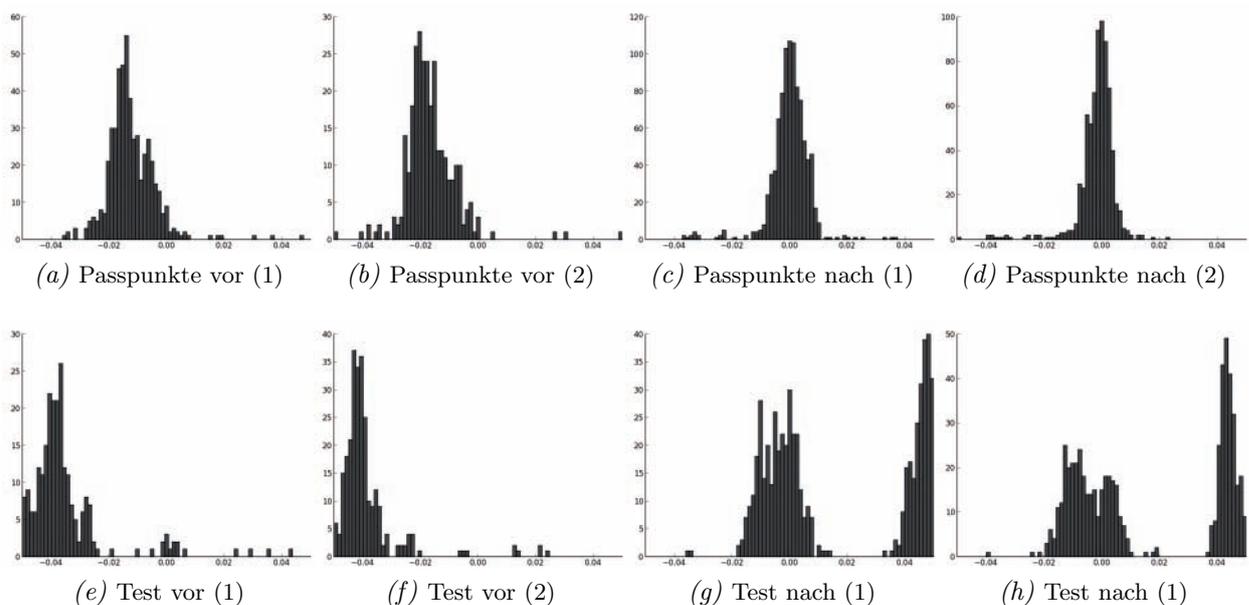


Abbildung 7.17.: Histogramme der Residuen mit Passpunkten an Kreuzungen für eine Epoche getrennt nach Scanstreifen ($k = 1,2$), von -5 cm bis +5 cm.

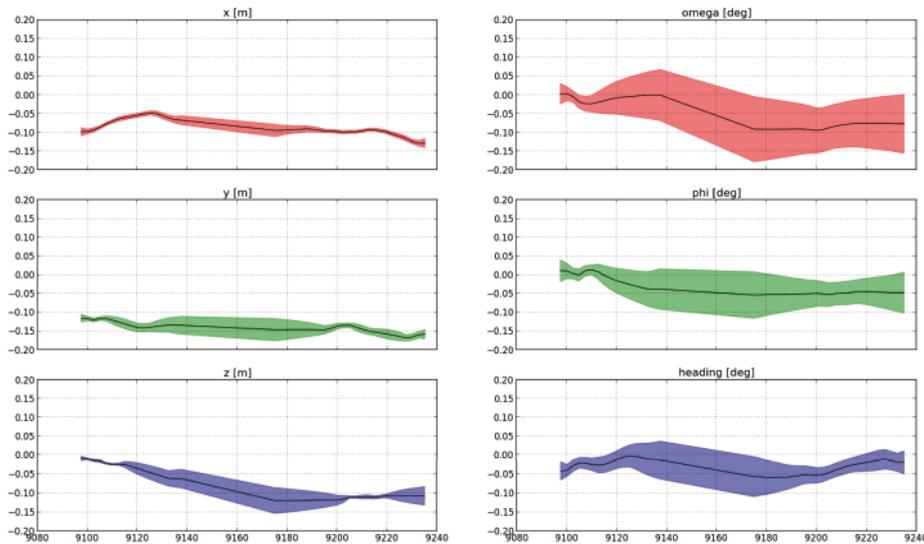


Abbildung 7.18.: Ergebnis der Ausgleichung für die geschätzte Korrektur der Ankerpunkte mit Referenzpunkten an Kreuzungen entlang der linearen Trajektorie [in m] für drei Translationen (links) und drei Rotationen (rechts).

keine Passpunkte zur Stützung der Trajektorie auf. Die Ergebnisse der Ausgleichung, die aus dieser Verteilung für die Ankerpunkte entlang der Trajektorie resultieren, zeigt Abb. 7.18. In den Abschnitten ohne Beobachtungen wird die Korrektur linear aus den benachbarten Ankerpunkten interpoliert, erkennbar am linearen Verlauf der Verbesserungen in der Mitte der Diagramme. Ein Vergleich mit Abb. 7.6 zeigt, dass eine lineare Interpolation zwischen den Ankerpunkten in diesem Scanstreifen für die Höhe nicht ausreichend ist. Die Korrektur der Höhe bleibt bis Position 9160 nahezu konstant bei -5 cm und nimmt bis Position 9200 ab, wobei auch in diesem Teilstück keine Höheninformation aus den Referenzdaten verfügbar ist.

Die Residuen nach der Ausgleichung zeigt Abb. 7.19 für Pass- und Kontrollpunkte. In den Abschnitten mit Beobachtungen wird eine hohe Genauigkeit der Scanpunkte nach der Ausgleichung erreicht (grüne Punkte in Abb. 7.19 a). Für Punkte auf Fassaden bestätigt sich dieses Ergebnis für die Kontrollpunkte (b). Große Residuen verbleiben dagegen im Straßenprofil (Punkte orange bis rot eingefärbt, Residuen ≥ 5 cm). Dies bestätigt, dass eine lineare Interpolation für diesen Scanstreifen nicht geeignet ist. Die Abschattung des GNSS-Signals innerhalb der Straße durch Bäume erzeugt hier lokale Effekte auf die Trajektorie, die nur mit zusätzlichen Beobachtungen korrigiert werden können.

Ergebnisse für alle Epochen

Die Ergebnisse der Passpunkte verhalten sich wie bereits bekannt: Der Mittelwert der Verteilung liegt bei -0,4 mm mit einer Standardabweichung von 5,5 mm. Die Zahl der Beobachtungen gleicht sich an die Anzahl der vorhandenen Passpunkte an. Die Kontrollpunkte enthalten nach der Ausgleichung dagegen insgesamt 9442 Ausreißer, etwa ein Viertel aller Kontrollpunkte. In 56 der 100 ausgewerteten Scanstreifen werden Straßenprofile oder einzelne Fassaden vollständig als Ausreißer markiert. Ausreißer in den Straßenpunkten treten unabhängig davon auf, ob im Scanstreifen eine Höhenreferenz vorhanden war. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse für alle 100 ausgewer-

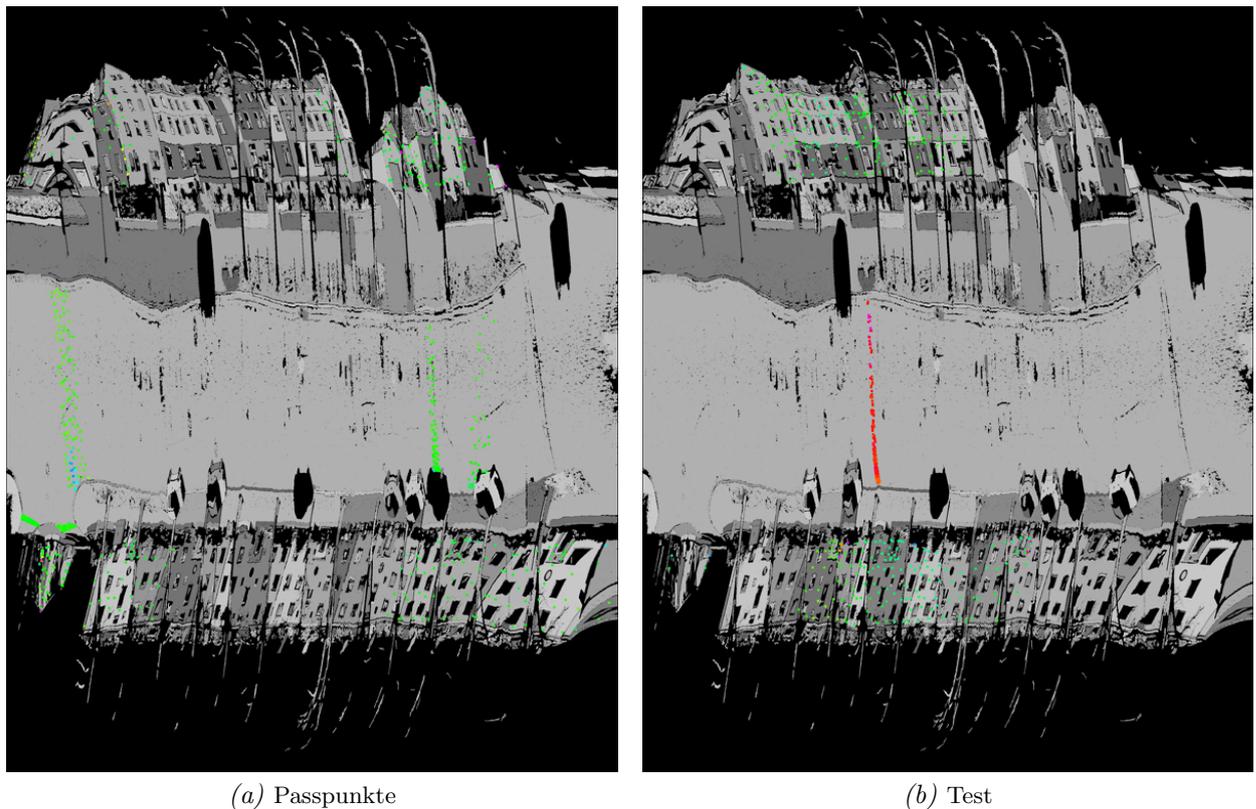


Abbildung 7.19.: Farbcodierte Residuen nach der Ausgleichung mit Referenzpunkten an Kreuzungen für einen Scanstreifen (blau = -5 cm, grün = 0 cm, rot = +5 cm).

teten Scanstreifen für die Pass- und Kontrollpunkte findet sich in Tabelle 7.5. Beide Scanner sind gemeinsam aufgeführt, da eine separate Auswertung keine Unterschiede in den Ergebnissen zeigte.

Die Histogramme der Residuen sind in Abb. 7.20 für die Passpunkte (a, b) und die Kontrollpunkte (c, d) dargestellt. Vor der Ausgleichung sind Unterschiede in den Verteilungen der Residuen erkennbar: In den Kontrollpunkten (Abb. 7.20 c) zeigt sich am rechten Rand ein Anstieg der Residuen. Die Passpunkte stellen diesen Effekt jedoch nicht dar. In der Ausgleichung wird der Mittelwert der Residuen für die Passpunkte von -15,3 mm in den Originaldaten auf -0,4 mm verringert. Die Standardabweichung der Verteilung geht von 22,4 mm auf 5,5 mm zurück. Das entspricht wieder der Scannergenauigkeit. Der Mittelwert der Verteilung für die Kontrollpunkte verschiebt sich da-

Tabelle 7.5.: Ergebnisse der Ausgleichung mit Passpunkten an Kreuzungen für Pass- (Pp) und Kontrollpunkte (Test) mit 100 Scanstreifen.

	vor der Ausgleichung		nach der Ausgleichung	
	Pp	Test	Pp	Test
Matching	84.642	39.981	86.022	40.620
Beobachtungen	39.788	15.550	84.301	31.178
μ [mm]	-15,3	-7,7	-0,4	1,5
σ [mm]	22,4	26,3	5,5	20,4

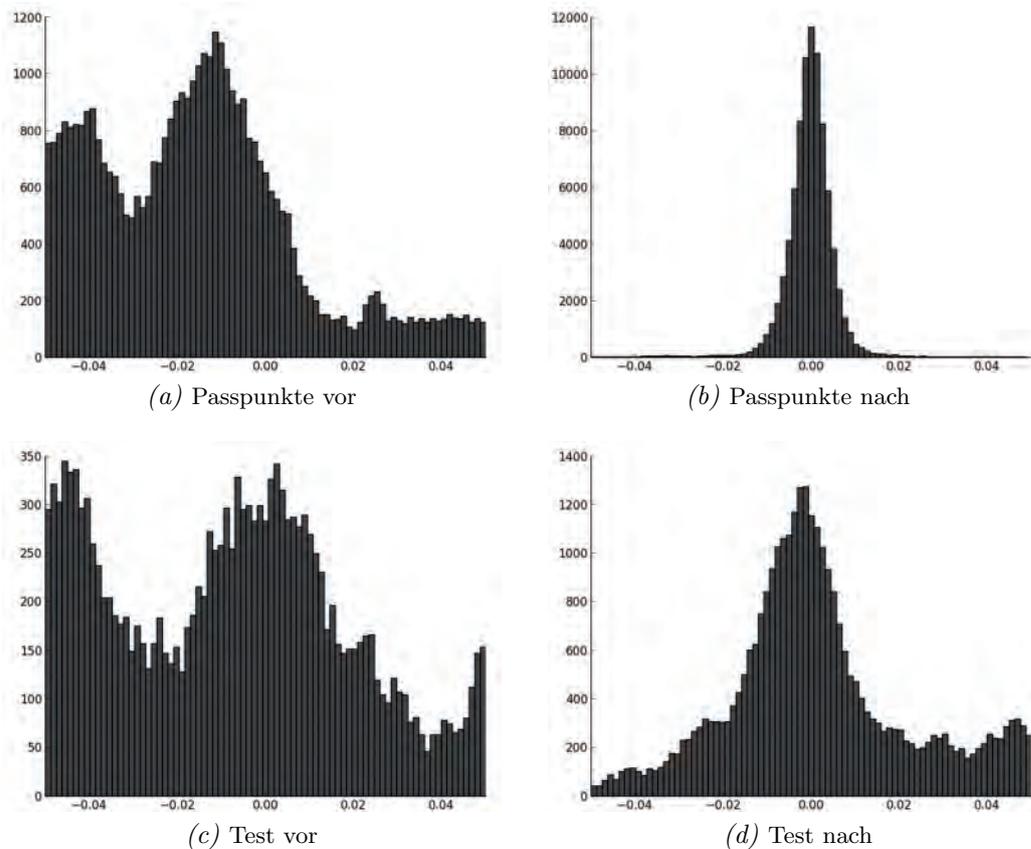


Abbildung 7.20.: Histogramme der Residuen für 100 Scanstreifen mit Passpunkten an Kreuzungen, Residuen von -5 cm bis $+5\text{ cm}$.

gegen von $-7,7\text{ mm}$ auf $+1,5\text{ mm}$. Die Standardabweichung beträgt vor der Ausgleichung $26,3\text{ mm}$, danach liegt sie immer noch bei $20,4\text{ mm}$. Das lokale Maximum von $+5\text{ cm}$ nach der Ausgleichung in Abb. 7.17 (*g, h*) wird durch die Vielzahl von Beobachtungen relativiert, dennoch zeigen die Residuen in Abb. 7.20 (*d*) weiterhin Abweichungen von der Normalverteilung und einen deutlichen Anstieg bei $+5\text{ cm}$.

7.5. Diskussion der Ergebnisse

Das vorliegende Kapitel beschreibt Experimente zur Genauigkeitsanalyse und Verbesserung von Mobile Mapping Punktwolken unter Verwendung hochgenauer Referenzpunkte. Es wird analysiert, mit welcher Dichte und Verteilung die Referenzpunkte vorliegen müssen, um eine hohe Genauigkeit in den Punktwolken zu erreichen.

Bei einer gleichmäßigen Verteilung der Referenzpunkte entlang der Scanstreifen werden gute Ergebnisse in der Ausgleichung erzielt. Experimente mit ausgedünnten Referenzpunkten liefern ebenfalls sehr gute Ergebnisse, wenn die Beobachtungen gleichmäßig entlang der Trajektorie verteilt sind und alle drei Raumrichtungen abdecken. Die Ergebnisse bei Verwendung von 25% der erfassten Referenzpunkte unterscheiden sich im untersuchten Beispiel nur minimal von den Ergebnissen unter

Verwendung von 75% oder 100% der Referenzpunkte. Die Dichte der Referenzpunkte hat demzufolge vor allem einen Einfluss auf die Unsicherheit der geschätzten Verbesserungen der Trajektorie.

Zusätzlich wurde ein Experiment mit rasterförmig angeordneten Referenzdaten durchgeführt. Dafür wurden die Referenzdaten im Testgebiet in einem 20 m-Raster in Pass- und Kontrollpunkte unterteilt. Die erzeugte ungleichmäßige Verteilung der Beobachtungen in der Ausgleichung führt in den Kontrolldaten zu einer größeren Standardabweichung nach der Ausgleichung. In den analysierten Daten ist die Standardabweichung für die Kontrollpunkte mit 9,4 mm fast doppelt so groß wie für die Passpunkte. Ein Grund kann die lineare Interpolation der Verbesserung der Trajektorie sein, wenn zwischen Ankerpunkten mit Beobachtungen Unterbrechungen durch Ankerpunkte ohne Beobachtungen auftreten. Eine ungünstige Verteilung der Passpunkte, aufgrund des zufälligen Rasters im Testgebiet, führt zu einer fehlerhaften Verbiegung der Trajektorie, erkennbar an den Ausreißern in den Kontrollpunkten. Ergebnisse für eine solche ungünstige Verteilung zeigt Abb. 7.21 mit Pass- (a) und Kontrollpunkten (b) für einen Scanstreifen. Das Ergebnis passt gut für die Höhe (Straßenprofile: grün), da Straßenprofile jeweils zur Hälfte in die Ausgleichung eingehen. Die Ausgleichung für die Lage erzeugt dagegen eine große Verschiebung (Fassadenpunkte: gelb, orange, magenta auf der einen bzw. cyan auf der gegenüberliegenden Fassade).

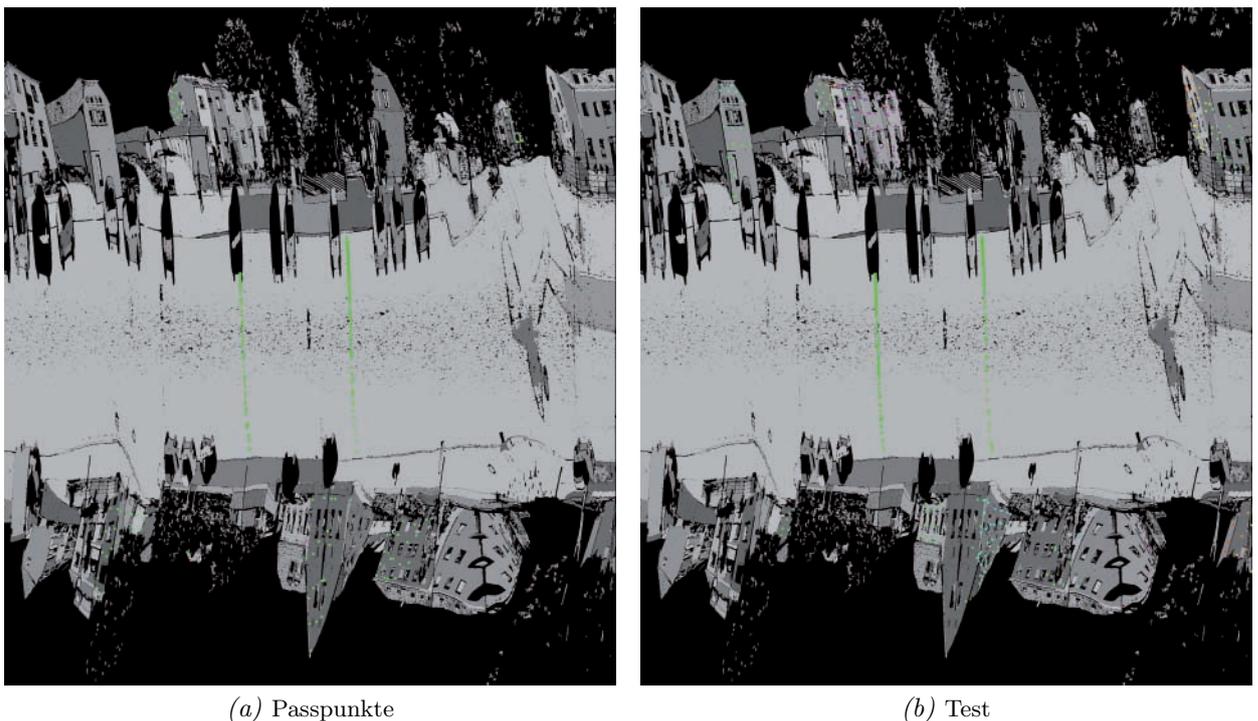


Abbildung 7.21.: Effekt von ungünstig verteilten Passpunkten auf die Residuen der Fassadenpunkte nach der Ausgleichung. Passpunkte in einem 20 m-Raster (blau = -5 cm, grün = 0 cm, rot = +5 cm, magenta: Ausreißer).

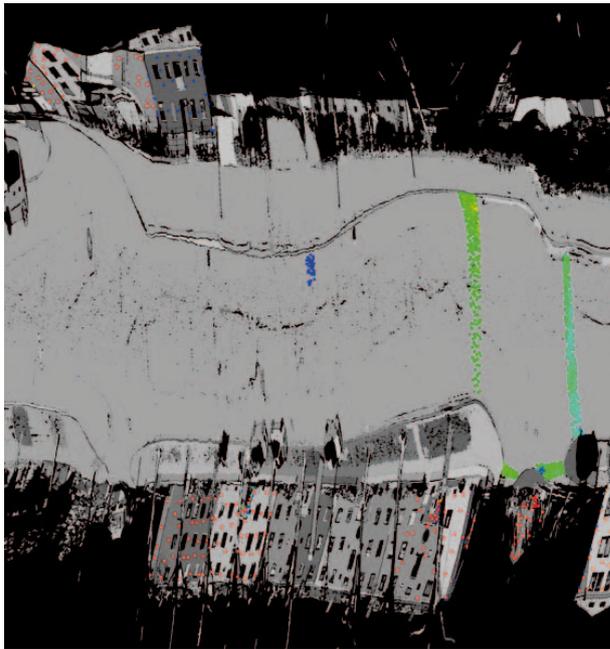
Eine Torsion der Punktwolke kann auftreten, wenn nur ein Teilstück eines Straßenprofils (z. B. am Straßenrand) zur Ausgleichung genutzt wird und keine Fassadenpunkte zur Korrektur der betreffenden Ankerpunkte beobachtet wurden. Die Passpunkte liefern an den beobachteten Regionen eine hohe Genauigkeit. Abb. 7.22 (a) vor und (b) nach der Ausgleichung verdeutlichen dieses Verhalten mit einem kleinen Abschnitt eines Straßenprofils (etwa in der Bildmitte). Dort werden die

Residuen zu den Passpunkten minimiert, die Farbe der Punkte wechselt von blau zu grün. Die Residuen in Abb. 7.22 (c) liegen in der Straße bei -5 cm (blaue Punkte im Straßenprofil). Nach der Ausgleichung zeigen die Kontrollpunkte dagegen ein anderes Verhalten (d): Während die Residuen auf einer Straßenseite minimiert werden, liegen die Residuen am unteren Ende des Profils bei +5 cm (Farbverlauf von grün in der Nähe der Referenzpunkte nach dunkelrot). Je größer der Abstand der Kontrollpunkte zu den Referenzpunkten im betrachteten Straßenprofil ist, desto größer ist nach der Ausgleichung die Abweichung der Punktwolke zu den tachymetrisch erfassten Punkten. Das rechts benachbarte Profil erfährt keine Verbesserung durch die Ausgleichung und bleibt dunkelblau (vgl. vor der Ausgleichung in (c)). Der Grund liegt in der Wahl des Ausgleichungsmodells. Dadurch beeinflussen sich aufgrund von Gl. (6.3) nur direkt benachbarte Ankerpunkte gegenseitig. Liegen zwischen zwei Ankerpunkten mit Beobachtungen weitere Ankerpunkte ohne Beobachtungen, so hat die Schätzung der Transformationsparameter an einem Ankerpunkt keinen Einfluss auf die Parameter des nächsten beobachteten Ankerpunktes. In der Bildmitte kann daher aufgrund der fehlenden Lagebeobachtungen sowohl mittels Rotation als auch durch eine Verschiebung der Punktwolke eine Minimierung der Residuen erreicht werden. Die geschätzte Verschiebung am nächstgelegenen Ankerpunkt wirkt jedoch aufgrund der Unterbrechung nicht.

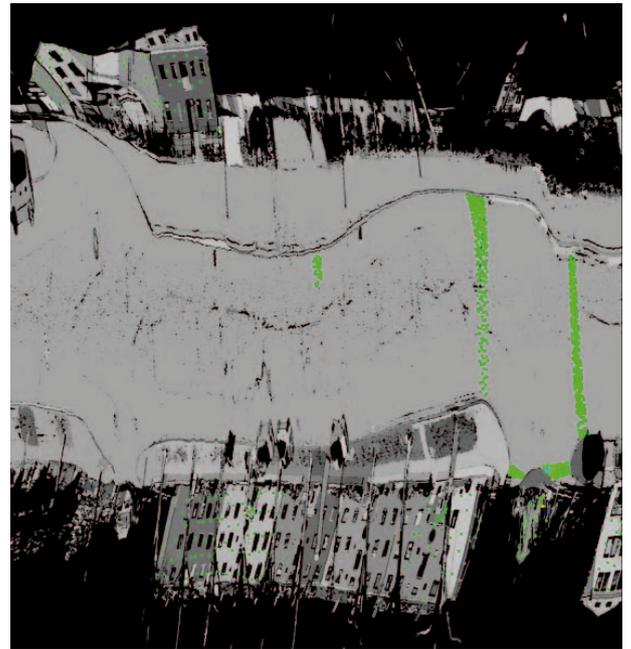
Deutlich zeigen sich die Auswirkungen der Verteilung von Referenzpunkten auch bei Verwendung von Beobachtungen an Kreuzungen. Dafür wurden nur Passpunkte an Straßenkreuzungen für die Ausgleichung genutzt, die Punkte innerhalb der Straßen wurden als Kontrolldaten verwendet. Auffällig ist die große Anzahl von Ausreißern in den Kontrolldaten. Nach der Ausgleichung liegt der Mittelwert der Verteilung der Residuen über alle ausgewerteten Scanstreifen bei 16 mm mit einer Standardabweichung von 25 mm. Die Ausreißer in den Kontrollpunkten werden durch die Interpolation der Trajektorie zwischen den ausgeglichenen Ankerpunkten hervorgerufen. Eine lineare Interpolation kann die Effekte in der Positionierung des Fahrzeugs offensichtlich nicht ausreichend modellieren. Passpunkte ausschließlich an Kreuzungen sind daher für Mobile Mapping Punktwolken im untersuchten Stadtgebiet nicht ausreichend, um für die gesamte Trajektorie eine gute Genauigkeit zu erreichen.

Auswahl und Verteilung der Referenzpunkte

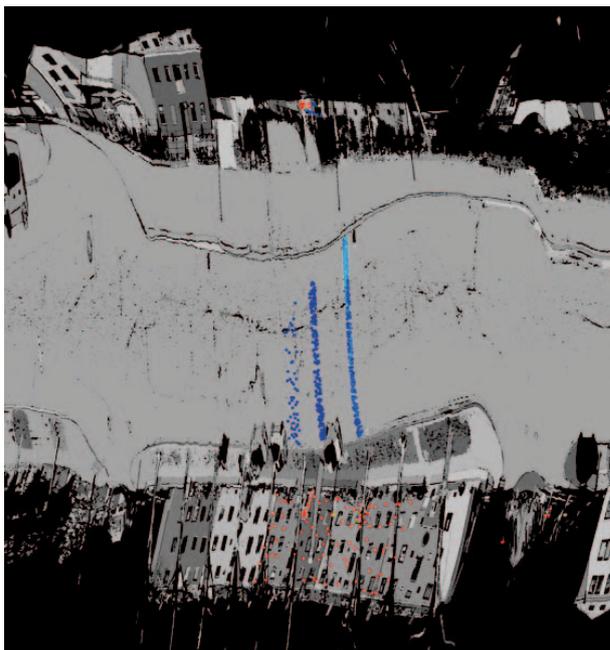
Eine gleichmäßige räumliche Verteilung von Passpunkten ist für eine hohe Genauigkeit wünschenswert, aus wirtschaftlichen Gründen ist diese aber nur für kleine Projektgebiete mit einer Ausdehnung von wenigen hundert Metern möglich. Als stabile Referenzobjekte bieten sich Fassaden von Gebäuden und die Straßenoberfläche an. Die Veränderungen im untersuchten Gebiet waren an diesen Objektarten gering, obwohl zwischen der Erfassung der Mobile Mapping Punktwolken und der Aufnahme der Referenzdaten ein zeitlicher Abstand von mehr als zwei Jahren lag. An Fassaden oder Gebäuden wurden im Testgebiet in der Auswertung keine baulichen Veränderungen festgestellt, die Straße wies durch Baumaßnahmen kleine Veränderungen am Straßenbelag auf. Die Experimente zeigen, dass wenige Referenzpunkte an Kreuzungen für die Ausgleichung der Scanstreifen nicht ausreichend sind. Lokale Effekte innerhalb der Straße werden durch eine Interpolation der Korrektur zwischen den Ankerpunkten mit Beobachtungen an Kreuzungen nur unzureichend modelliert. Daher sind innerhalb der Straßen weitere 3D-Passpunkte oder 1D-Passpunkte mit drei unterschiedlichen Normalenrichtungen erforderlich. 1D-Passpunkte müssen räumlich nah beieinander liegen, sodass auf einen Ankerpunkt jeweils alle drei Richtungen wirken.



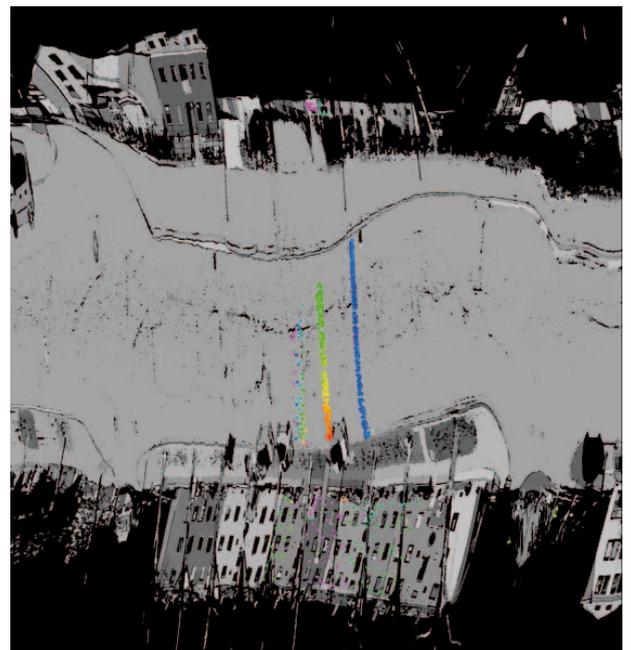
(a) Passpunkte vor



(b) Passpunkte nach



(c) Test vor



(d) Test nach

Abbildung 7.22.: Torsion einer Punktwolke bei einseitiger Verteilung der Passpunkte.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit bewertet das Potential von terrestrischen Mobile Mapping Punktwolken zur Erzeugung hochgenauer Karten. Zu Beginn werden die Grundlagen der Technologie, geometrische Grundlagen zur kinematischen Erfassung der Punktwolken aus Einzelmessungen eines Laserscanners und die direkte Georeferenzierung mittels GNSS- und inertialen Messverfahren erläutert. Zusätzlich werden die Datenbasis, verschiedene Methoden zur Georeferenzierung von Geodaten großer Gebiete und Algorithmen zur Segmentierung von Objekten aus Punktwolken erklärt. Der aktuelle Stand der Forschung liefert einen Überblick zu den zwei Hauptthemen der Arbeit und umfasst die Genauigkeitsanalyse von Mobile Mapping Punktwolken sowie deren geometrische Korrektur mit Hilfe von Passpunkten.

Die Erfassung von Geodaten ist kein neues Thema. Große Datenbestände der amtlichen Vermessungsverwaltungen z. B. ALKIS, enthalten für Deutschland flächendeckend Umgebungsinformation. Allerdings ändern sich, gerade im Hinblick auf autonome Fahrzeuge im Straßenverkehr, die Anforderungen an die Genauigkeit und die Inhalte der Karten. Eine Analyse verfügbarer Daten und ein Anwendungsbeispiel von Landmarken-Karten zur Lokalisierung von Fahrzeugen verdeutlichen die Anforderungen an die Mobile Mapping Daten und an deren Auswertung.

Die Genauigkeitsanalyse der Mobile Mapping Daten wurde in der vorliegenden Arbeit mit zwei unterschiedlichen Ansätzen durchgeführt. Der punktwolkenbasierte Ansatz arbeitet mit unstrukturierten Punktwolken aus unterschiedlichen Epochen. Die Punkte werden in Kacheln sortiert, um mittels des ICP-Algorithmus die Verschiebungsvektoren zwischen den Punktwolken unterschiedlicher Epochen in jeder Kachel zu ermitteln. Eine Segmentierung einzelner identifizierbarer Objekte erfolgt nicht, sodass kein direkter Vergleich mit Objekten aus anderen Datenquellen möglich ist. Innerhalb der Kacheln werden jedoch Objekte mit einer starken Streuung der Punktnormalen, z. B. Vegetation, mittels Surface-Growing eliminiert. Die Methode benötigt daher vorrangig ebene bzw. flächenhafte Objekte, wie sie in bebauten Gebieten sehr häufig zu finden sind. Der objektbasierte Ansatz nutzt dagegen segmentierte Objekte zur Analyse der Genauigkeit der Punktwolken, wodurch ein Vergleich mit Objekten mit bekannten globalen Koordinaten möglich ist. Dafür wurden in dieser Arbeit Ebenen und Zylinder voll-automatisch aus den Punktwolken segmentiert. Mit Hilfe von manuell aus den Punktwolken segmentierten Objekten, wurden in dieser Arbeit zusätzlich die Qualität der Segmentierung untersucht. Als externe Referenzdaten wurden Masten der Straßenbeleuchtung als Zylinderobjekte mittels Tachymeter erfasst.

Beide Verfahren zeigen das Verbesserungspotential der Punktwolken, sowohl bei der ermittelten Verschiebung zwischen den Daten unterschiedlicher Epochen als auch im Vergleich zu externen Referenzdaten, wie etwa den mittels Tachymeter vermessenen Stangen. Die Abweichungen zwischen den Daten liegen dabei im Bereich mehrerer Zentimeter bis einiger Dezimeter. Der punktwolkenbasierte Ansatz eignet sich zur schnellen Auswertung und Darstellung der Datenqualität, wenn Punktwolken aus unterschiedlichen Epochen vorliegen. Für eine detailliertere Analyse der Daten

und einen Vergleich mit externen Datenquellen kann der objektbasierte Ansatz genutzt werden. Ein Vorteil beider Ansätze ist es, dass die Verfahren auch genutzt werden können, wenn ausschließlich Punktwolken und keine weiteren geometrischen Informationen für die Sensoren oder über die Trajektorie verfügbar sind.

Anschließend wurde ein Ansatz zur streifenbasierten Ausgleichung der Scandaten unter Verwendung von Referenzdaten vorgestellt. Dieser Ansatz liefert eine Aussage zur Genauigkeit der Mobile Mapping Daten vor der Ausgleichung und ermöglicht zusätzlich eine geometrische Verbesserung der Punktwolken mit hoher Genauigkeit. Anwendungsgebiete können die Analyse eines Mobile Mapping Systems in realer Umgebung oder die Überprüfung von Daten sein. Der gewählte Ansatz zur Schätzung von Korrekturwerten für die Beobachtungen entlang der Trajektorie in einer Ausgleichung, erfordert jedoch Kenntnisse über die Scangeometrie und die Trajektorie bei der Datenerfassung. Dazu wurden entlang der Trajektorie Ankerpunkte definiert, für die Korrekturwerte zur Minimierung der Residuen zwischen lokalen Oberflächen der Scanpunkte und Referenzpunkten geschätzt werden. Zwischen den Ankerpunkten wurden die Korrekturparameter linear interpoliert. Verschiedene Experimente zeigen das Potential der Ausgleichung bei Verwendung dichter Referenzdaten. Dabei wurde die Verteilung der Residuen bei 150 ausgewerteten Scanstreifen mit etwa 150.000 Beobachtungen vor der Ausgleichung von $\mu = -13,0$ mm (Mittelwert) und einer Standardabweichung $\sigma = 24,1$ mm auf $\mu = -0,6$ mm (Mittelwert) mit einer Standardabweichung $\sigma = 5,5$ mm reduziert. Die hohe Dichte der Referenzdaten ist aufgrund des hohen Zeitaufwands bei der gewählten Aufnahmemethode jedoch nur für kleine Gebiete möglich. Daher wurden Experimente zur benötigten Verteilung der Passpunkte durchgeführt. Ein Test mit Passpunkten an Kreuzungen und Kontrollpunkten innerhalb der Straßen zeigt z. B. deutliche Abweichungen von der Verteilung bei Verwendung dichter Referenzdaten. Die Kontrollpunkte in den ausgewerteten Scanstreifen liefern für die Residuen eine Verteilung mit $\mu = 1,5$ mm ($\sigma = 20,4$ mm) nach der Ausgleichung. Für die untersuchten Daten sind daher wenige Passpunkte ausschließlich an Kreuzungen für eine hohe Genauigkeit über den gesamten Datensatz nicht ausreichend. Zusätzliche 3D-Passpunkte oder mehrere 1D-Passpunkte für alle drei Raumrichtungen innerhalb der erfassten Straßen sind erforderlich, da die auftretenden GNSS-Effekte innerhalb der Straßen nicht durch die verwendete lineare Interpolation approximiert werden können.

Dies führt zur Frage einer kostengünstigen Möglichkeit zur Generierung von Passpunkten. Die Erfassung eines dichten Referenzpunktfelds mittels Tachymeter, wie in der Arbeit durchgeführt, ist aufgrund des hohen Aufwands nicht für jedes Projektgebiet oder für größere Gebiete wirtschaftlich möglich. Eine andere Variante ist der Einsatz terrestrischer Scanner zur Aufnahme dichter Umgebungsinformation als Referenzdaten. In diesem Fall ist jedoch ebenfalls ein hochgenaues Netz von Anschlusspunkten zur Stationierung des Scanners erforderlich. Weitere zu analysierende Datenquellen für Referenzdaten stellen z. B. Orthophotos oder digitale Geländemodelle (DGM) dar. Eine Schwierigkeit stellt in diesem Fall die Zuordnung korrespondierender Objekte zwischen den Daten dar, da sich die Aufnahmeverfahren und die erzeugten Daten von Mobile Mapping Punktwolken grundsätzlich unterscheiden.

Die Verfahren zur Genauigkeitsanalyse können auf andere Anwendungsgebiete erweitert werden. Für Karten spielt die Aktualisierung eine wichtige Rolle, gerade im Hinblick auf autonome Fahrzeuge. Punktwolken unterschiedlicher Epochen erfordern eine Analyse der Veränderung oder der

Stabilität der Objekte, um diese in der Karte fortzuführen. Eine Genauigkeitsanalyse mittels des ICP-Algorithmus kann Veränderungen in den Punktwolken anhand großer Residuen nach der gemeinsamen Referenzierung identifizieren. Eine anschließende zeitliche Analyse ermöglicht dann die Identifizierung stabiler und veränderlicher Objekte. Änderungen an großen Objekten, z. B. komplett neue Fassaden, würde der ICP-Algorithmus jedoch nicht als Ausreißer erkennen.

In dieser Arbeit werden die Umgebungsdaten nur mit einem einzigen hochgenauen Sensorsystem erfasst. Eine flächendeckend hochaktuelle Karte, wie für autonome Fahrzeuge gefordert, kann damit nicht wirtschaftlich realisiert werden. Betrachtet man dazu die aktuellen Entwicklungen in der Automobilindustrie, werden in (naher) Zukunft sehr viele Fahrzeuge mit Sensoren zur Umgebungserfassung ausgestattet sein. Dadurch entstehen sehr viele überlappende Datensätze, jedoch mit geringerer Genauigkeit als mit dem in der Arbeit genutzten Sensorsystem. Wird der vorgestellte Ansatz zur Verbesserung der Scanstreifen entsprechend um zusätzliche Verknüpfungspunkte zwischen den Punktwolken erweitert, ist eine gemeinsame Ausgleichung der Daten aller Fahrzeuge möglich. Neben Punktwolken aus LiDAR-Sensoren können weitere Sensoren, z. B. Kameras, in die Auswertung integriert werden. Durch die zusätzlichen Beobachtungen kann auch die Anzahl der benötigten Referenzpunkte, und damit der Aufwand zur Erfassung einer Referenz, reduziert werden. Karten werden dann mittels *CrowdSensing* erstellt, verdichtet und später aktualisiert, sodass der Einsatz speziell ausgerüsteter Systeme minimiert werden kann.

A. Laserscanner und Mobile Mapping Systeme

Tabelle A.1.: Spezifikationen ausgewählter Laserscanner für mobile Anwendungen (Stand Januar 2017).

Hersteller Scanner	Pktrate [Pkt/s]	Blickfeld [°]	Reichweite [m]	Genauigkeit [mm]	Bemerkung
Profilscanner (2D)					
RIEGL , www.riegl.com					
VQ-450	550 k	360	bis 220	8,0	200 Linien/s
VUX-1HA	1.000 k	360	235 ^a	5,0	250 Linien/s
Zoller + Fröhlich , www.zf-laser.com					
Z+F Profiler 9012	1.000 k	360	bis 119	0,2-3,1 ^b	200 Linien/s
FARO , www.faro.com					
Focus 3D X330	976 k	300	bis 330	0,3-0,5 ^c	97 Linien/s
SICK , www.sick.com					
LMS 511	114 k ^d	bis 80	190	25-35 ± 7-9	bis 100 Linien/s
3D-Scanner					
Velodyne Acoustics , http://velodynelidar.com					
HDL-64E	1.300 k	26,8	bis 120	< 20	64 Strahlen
HDL-32E	700 k	40	100	20	32 Strahlen
VLP-16	300 k	30	bis 100	30	16 Strahlen
SICK , www.sick.com					
LD-MRS 4-Layer	136 k	40	bis 250	100	4 Ebenen
Solid State/ Flash LiDAR					
Quanergy , http://quanergy.com/s3/					
S3 Solid State LiDAR	500 k	120	bis 150	50 ^e	OPA ^f
Continental AG , www.continental-automotive.com					
Hi-Res 3D Flash LIDAR			bis 200	Zentimeter	30 Hz

^abei 1000 kHz und voller Leistung

^babhängig von Entfernung (10 - 50 m) und Reflektivität der Oberfläche

^cabhängig von Entfernung (10 - 25 m) und Reflektivität der Oberfläche

^dabhängig von gewählter Messfrequenz und Winkelauflösung

^eauf 100 m

^foptisches phasen-gesteuertes Array

Tabelle A.2.: Spezifikationen Laserscanner RIEGL VQ-250 (Riegl LMS GmbH, 2012b).

Messprinzip	Laufzeitmessung, Echo-Signal-Digitalisierung, Online Analyse der Wellenform
Scanmechanismus	rotierender Spiegel
Sichtfeld	360°, Begrenzung möglich
Pulsrate [kHz]	bis 300
Scanfrequenz [Linien/s]	bis 100
Genauigkeit/ Präzision [mm]	10/ 5
Winkelschrittweite [°]	0,018 - 0,72
Winkelauflösung [°]	0,001
Echo Signal Intensität	16 Bit Intensitätsinformation
Reichweite bei natürlichen Zielen [m]	75 (bei $\rho \geq 10\%$) - 200 (bei $\rho \geq 80\%$)
Anzahl Ziele pro Puls	bis zu 5 bei 300 kHz

Tabelle A.3.: Auswahl kommerzieller terrestrischer Mobile Mapping Systeme verschiedener Hersteller mit Laserscannern sowie (optional) Kameras zur Umgebungserfassung. Stand: Oktober 2016.

Mobile Mapping System	Sensoren zur Umgebungserfassung
Mitsubishi Electric Corporation^a	
MMS-X	2 oder 4 SICK-Scanner, bis zu 6 Kameras
MMS-X320R	2 SICK-Scanner und 1 VQ-250 Scanner, 3 Kameras
Optech Inc.^b	
Lynx SG1	2 Optech-Scanner, bis zu 4 Kameras und Ladybug
Lynx MG1	1 Optech-Scanner, bis zu 2 Kameras und Ladybug
Topcon Positioning Systems, Inc.^c	
IP-S2 Compact+	3 oder 5 SICK Scanner, Ladybug3
IP-S3 HD	1 Velodyne HDL-32E Scanner, Ladybug5
RIEGL Laser Measurement Systems GmbH^d	
VMX-450 (Nachfolger VMX-250)	2 VQ-450 Scanner, bis zu 6 Kameras
VMX-1HA	2 VUX-1HA Scanner, bis zu 6 Kameras
Leica Geosystems GmbH^e	
Leica Pegasus: Two	1 oder mehrere Scanner, 6-8 Kameras, Verschiedene Scanner, z. B. Z+F Profiler, Leica P20
3D Laser Mapping^f	
StreetMapper 360	2 VQ-250 Laserscanner, verschiedene Kamerasysteme
StreetMapper GIS	1 VQ-250 Laserscanner, Ladybug3
StreetmapperIV	1 <i>RIEGL</i> VUX-Laserscanner, optional 1 weiterer Scanner, Ladybug3
Nur Laserscanner	
SABRE Land and Sea Ltd.^g	
SABRE-SCAN	Laserscanner FARO Focus 3D
3D Laser Mapping	
Robin	1 Laserscanner der <i>RIEGL</i> VUX-Serie

^awww.mitsubishielectric.com/bu/mms/

^bwww.teledyneoptech.com/index.php/products/mobile-survey/

^c<https://www.topconpositioning.com/mass-data-and-volume-collection/mobile-mapping/ip-s3>

^d<http://www.riegl.com/nc/products/mobile-scanning/>

^ewww.leica-geosystems.de

^fwww.3dlasermapping.com

^gwww.sabresurvey.com

B. Ergebnisse für eine Epoche mit vollständigen Referenzdaten

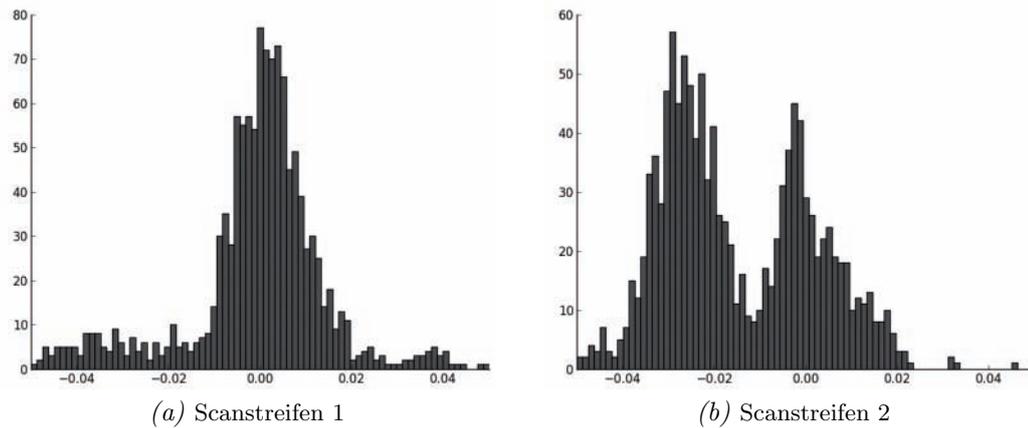


Abbildung B.1.: Residuen zwischen Referenzdaten und Punktwolken vor der Ausgleichung der Trajektorie von -5 cm bis $+5\text{ cm}$. Scanstreifen 1: $\mu = -0,6\text{ mm}$, $\sigma = 14,9\text{ mm}$, Scanstreifen 2: $\mu = -14,9\text{ mm}$, $\sigma = 16,1\text{ mm}$

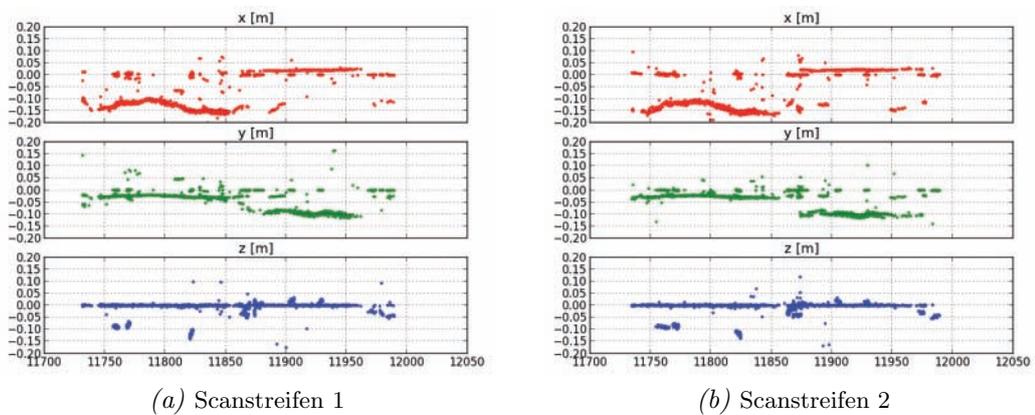
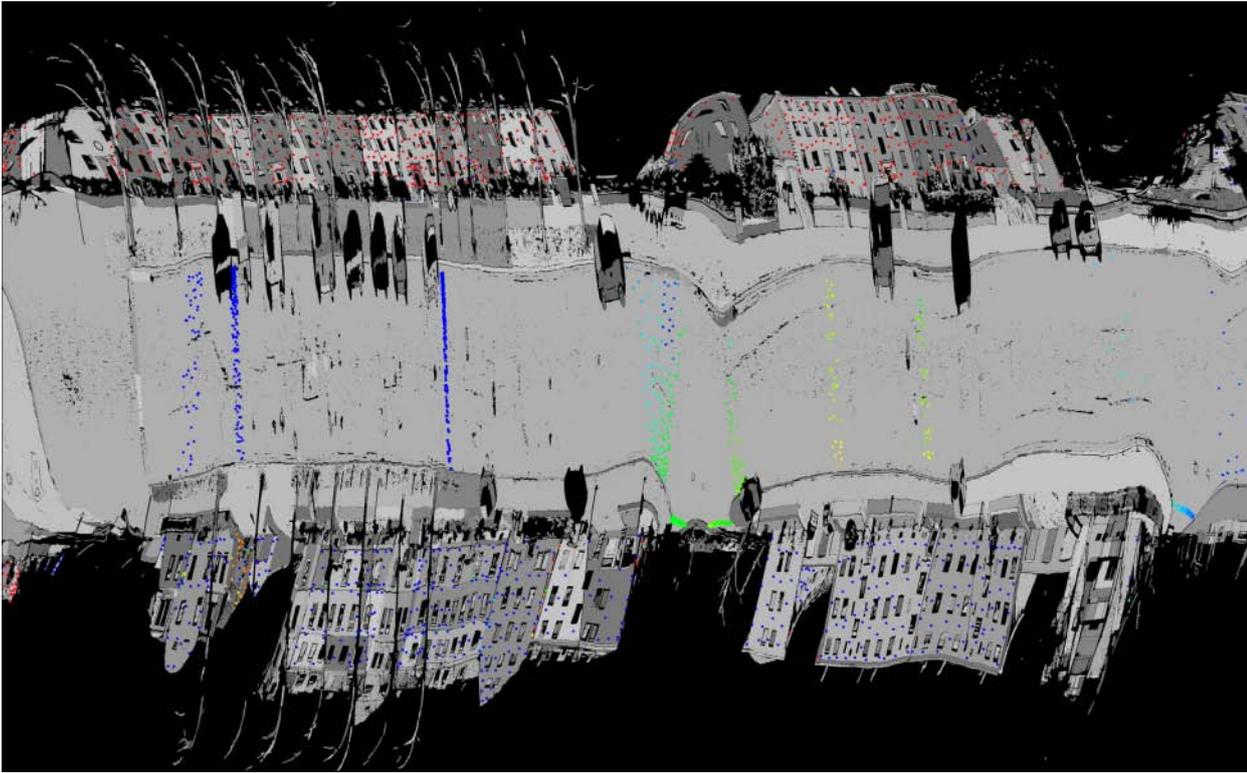
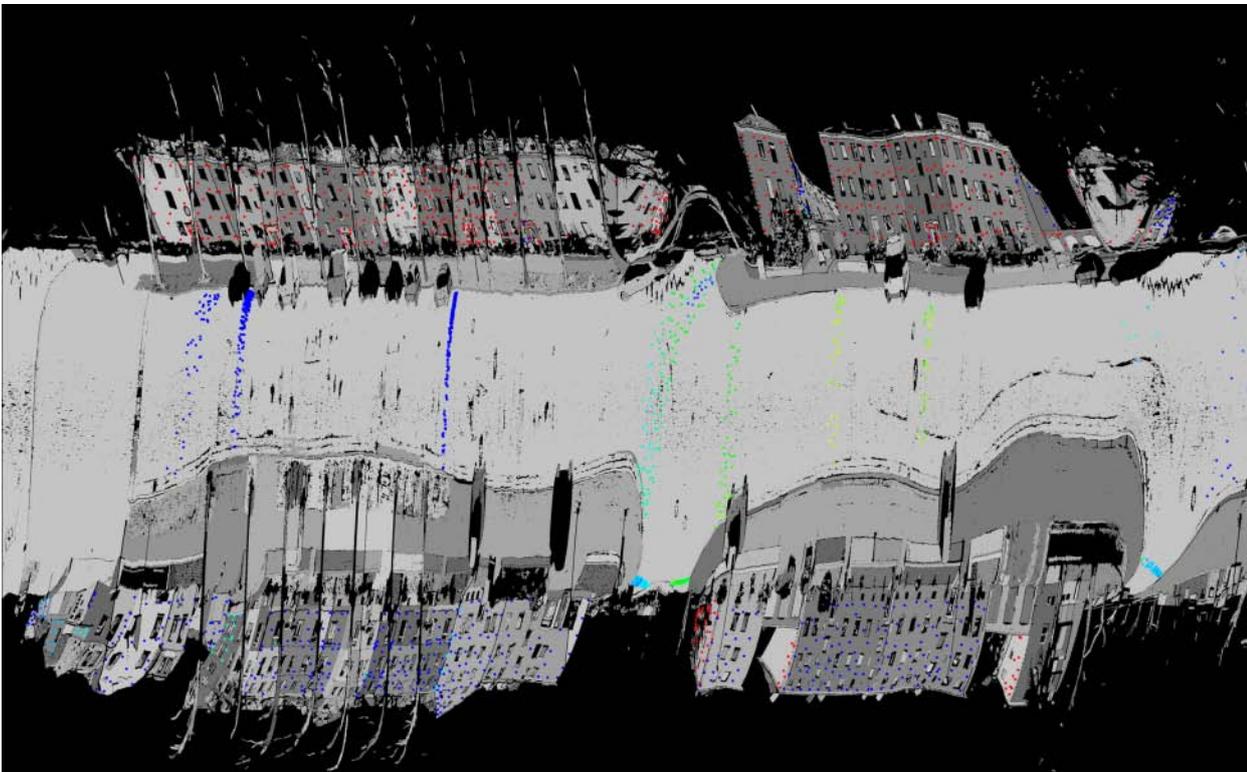


Abbildung B.2.: Residuenvektoren zwischen Referenzdaten und Punktwolken vor der Ausgleichung der Trajektorie, getrennt nach x -, y - und z -Komponente.



(a) Scanstreifen 1 mit 1185 Referenzpunkten



(b) Scanstreifen 2 mit 1188 Referenzpunkten

Abbildung B.3.: Residuen zwischen Referenzdaten und Punktwolken vor der Ausgleichung der Trajektorie (blau = -5 cm, grün = 0 cm, rot = +5 cm) für eine 250 m lange Trajektorie. Verlauf der Trajektorie in Nord-Süd-Richtung bis zur Kreuzung in der Bildmitte, dann in Ost-West-Richtung.

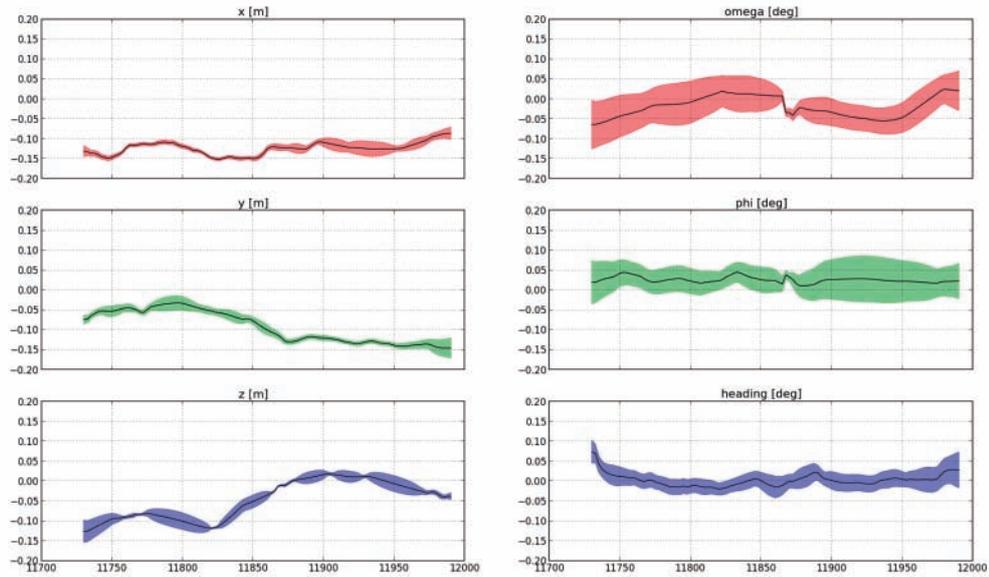


Abbildung B.4.: Ergebnis der Ausgleichung für die Ankerpunkte entlang der linearen Trajektorie [in m] mit beschränkten lokalen Variationen nach Gl. 6.3.

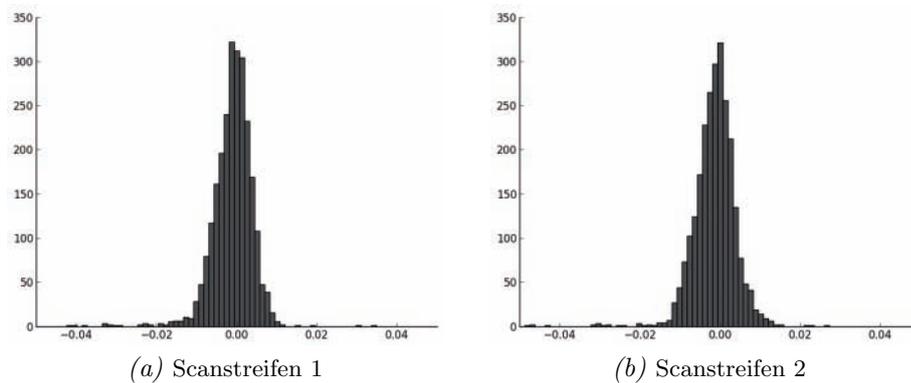


Abbildung B.5.: Residuen zwischen Referenzdaten und Punktwolken nach der Ausgleichung der Trajektorie im Bereich von -5 cm bis $+5\text{ cm}$. Scanner 1: $\mu = -1\text{ mm}$, $\sigma = 4,9\text{ mm}$, Scanner 2: $\mu = -1,3\text{ mm}$, $\sigma = 5,3\text{ mm}$.

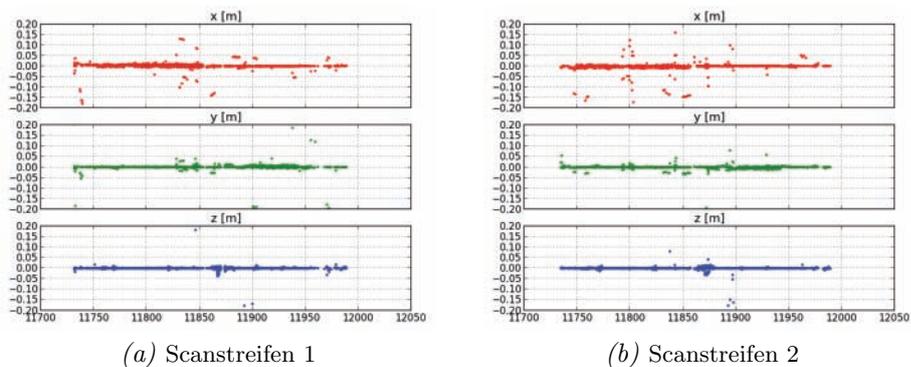
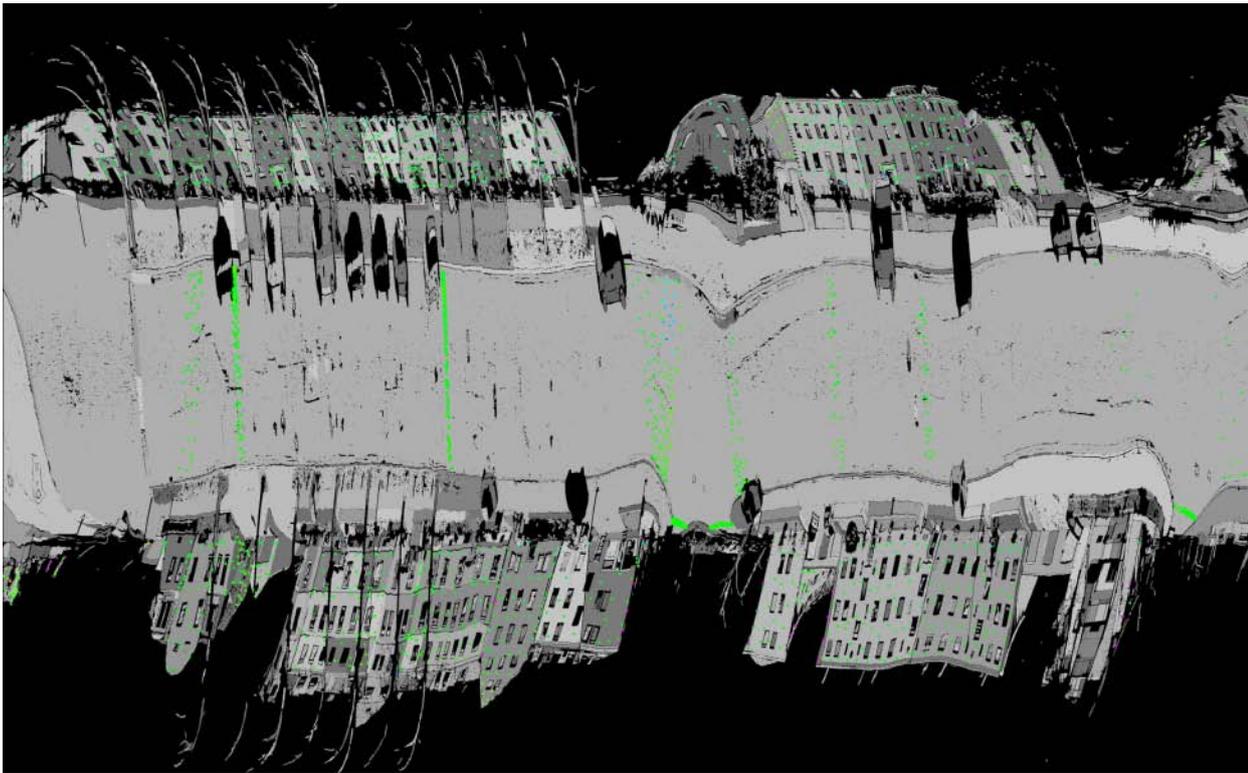
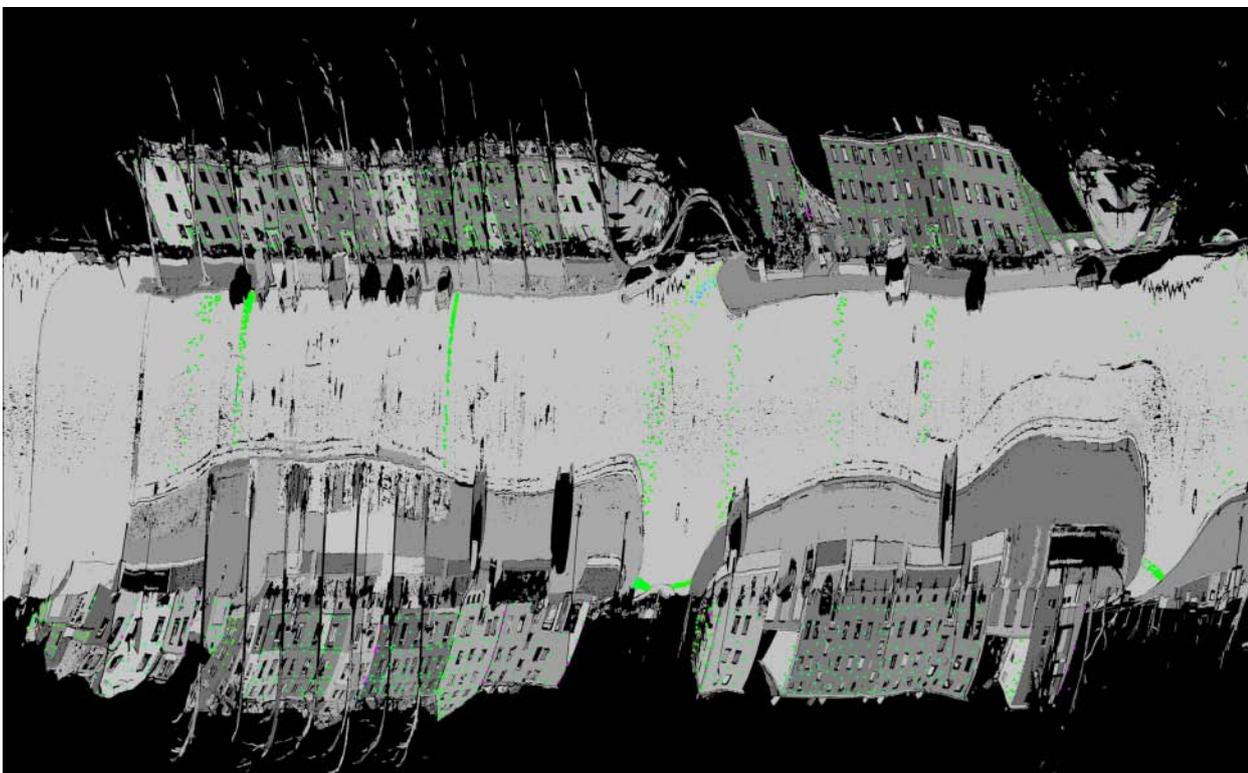


Abbildung B.6.: Residuenvektoren zwischen Referenzdaten und Punktwolken nach der Ausgleichung der Trajektorie, getrennt nach x -, y - und z -Komponente.



(a) Scanstreifen 1 mit 2485 Referenzpunkten



(b) Scanstreifen 2 mit 2514 Referenzpunkten

Abbildung B.7.: Farbcodierte Residuen zwischen Referenzpunkten und Punktwolken nach der Ausgleichung der Trajektorie (blau = -5 cm, grün = 0 cm, rot = +5 cm, Magenta: detektierte Ausreißer).

C. Ergebnisse für reduzierte Referenzdaten-Auswahl

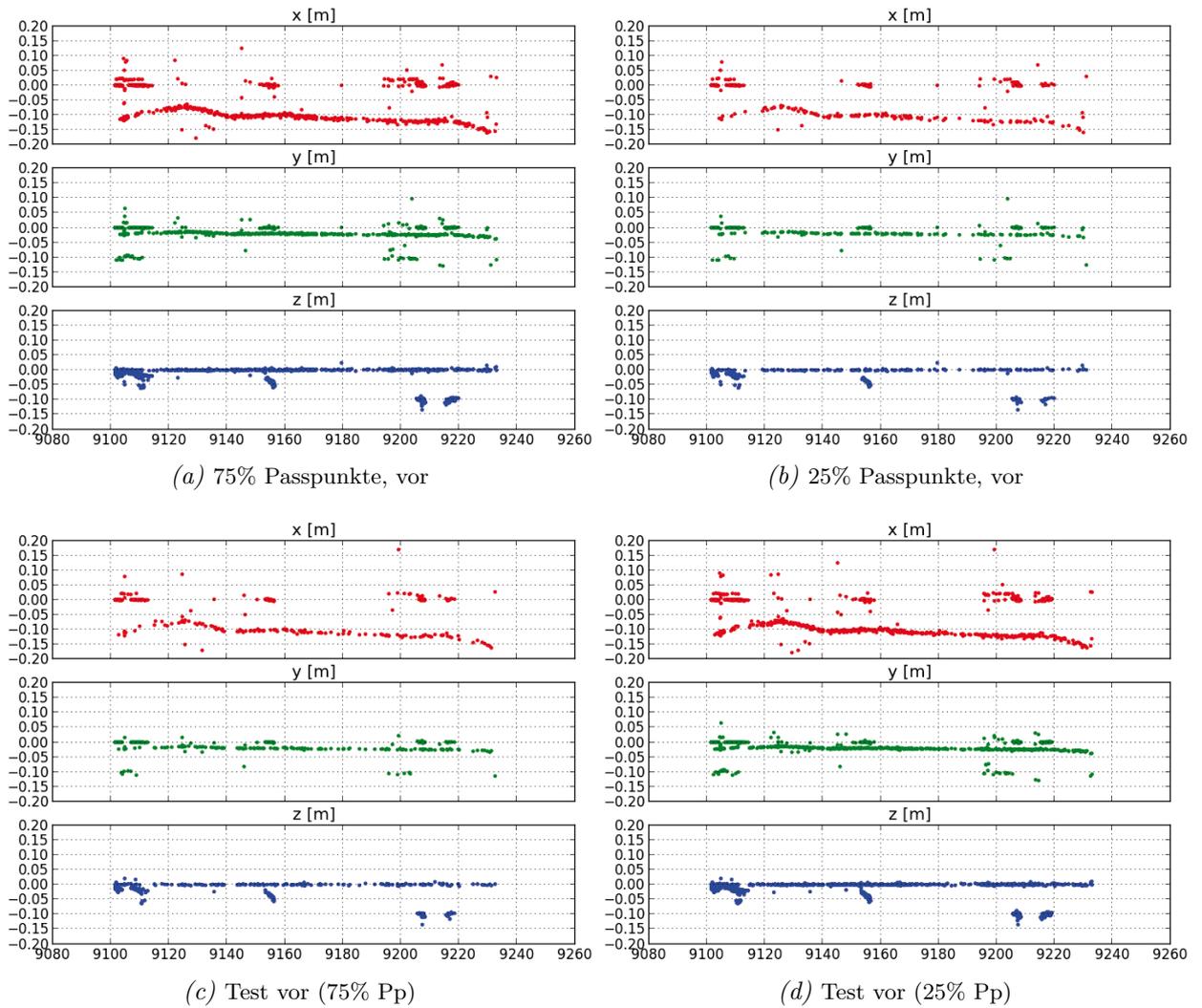
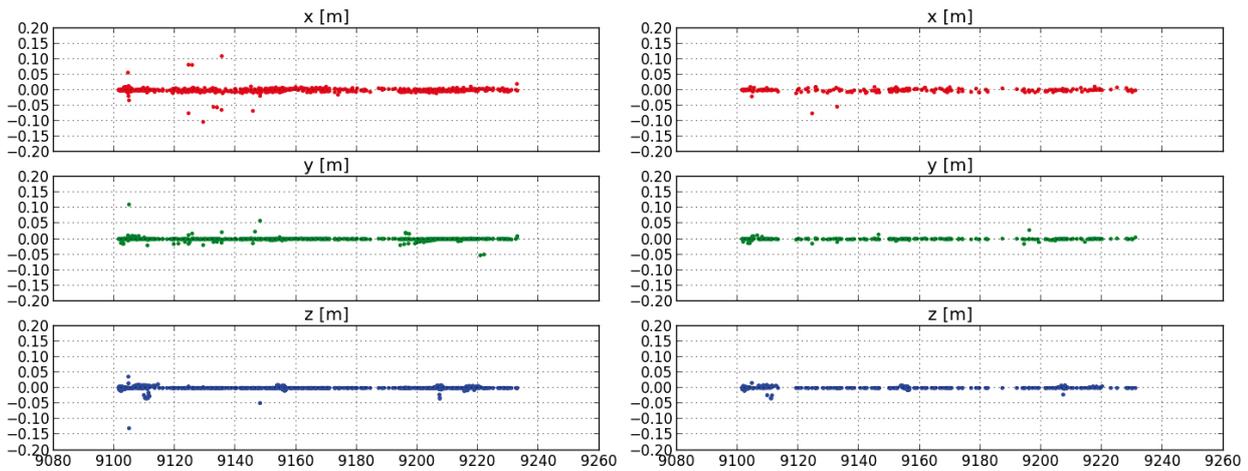
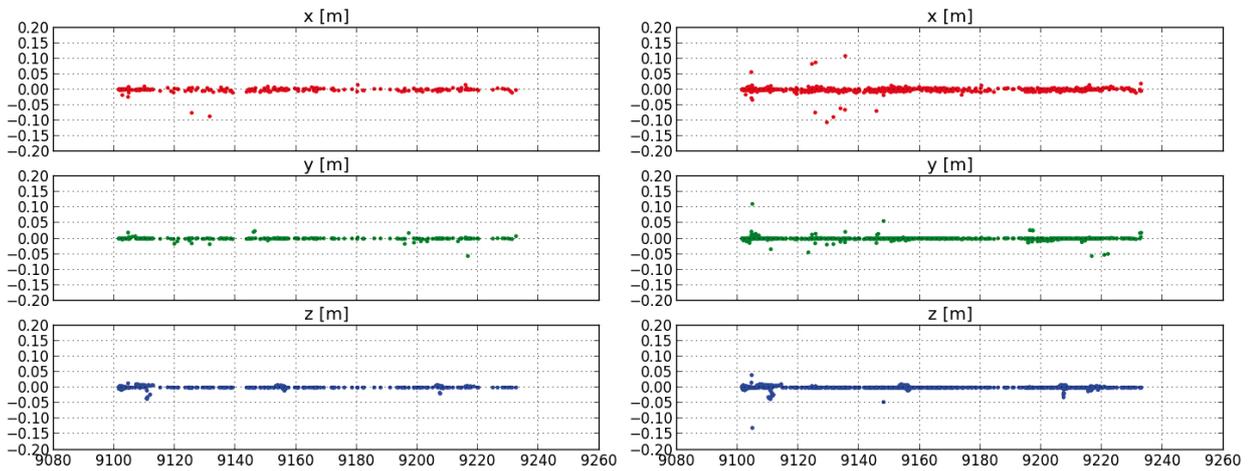


Abbildung C.1.: Referenz gleichmäßig reduziert: Verteilung der Beobachtungen unter Verwendung von 75% und 25% der Referenzpunkte als Passpunkte vor der Ausgleich. Die übrige Punkte werden als Kontrollpunkte (Test) genutzt.



(a) 75% Passpunkte, nach

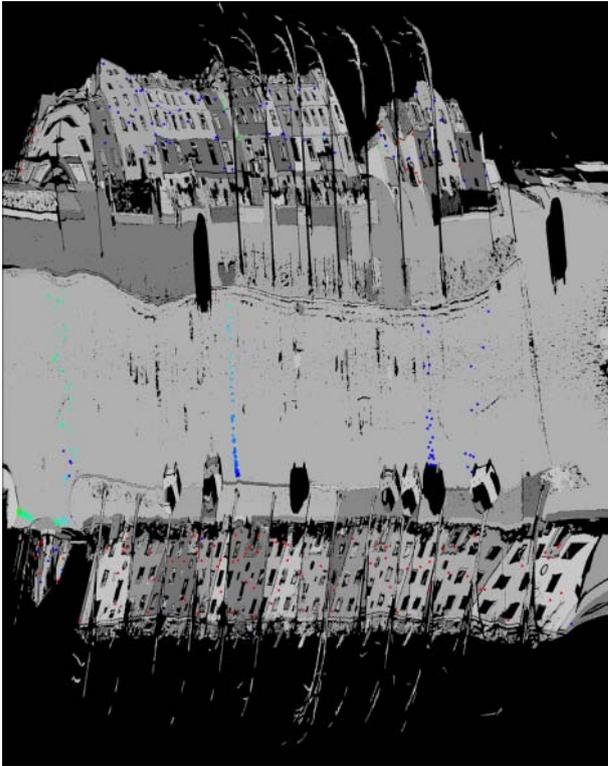
(b) 25% Passpunkte, nach



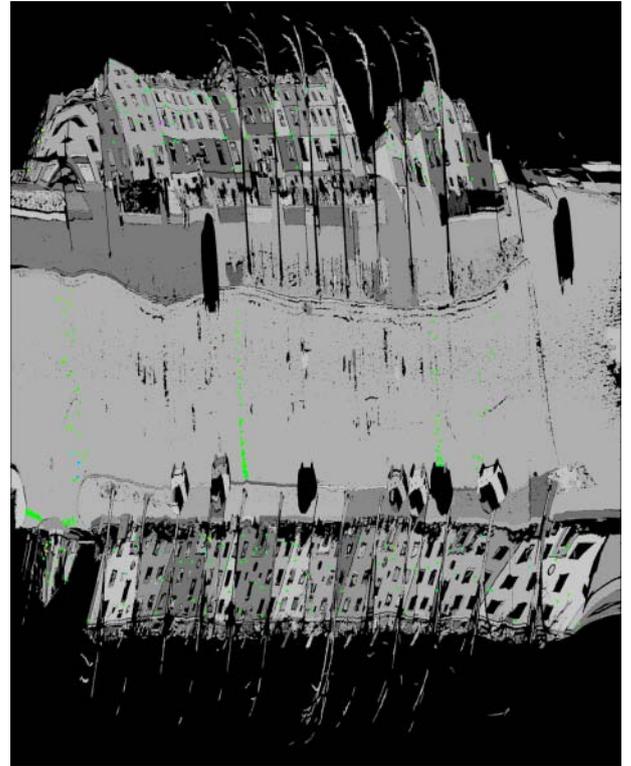
(c) Test nach (75% Pp)

(d) Test nach (25% Pp)

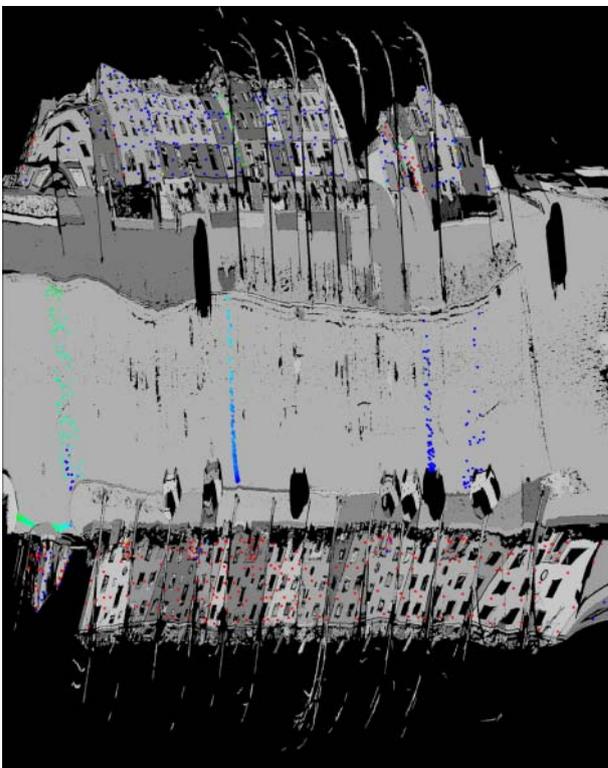
Abbildung C.2.: Referenz gleichmäßig reduziert: Verteilung der Beobachtungen unter Verwendung von 75% und 25% der Referenzpunkte nach der Ausgleichung. Die übrigen Punkte werden als Kontrollpunkte (Test) genutzt.



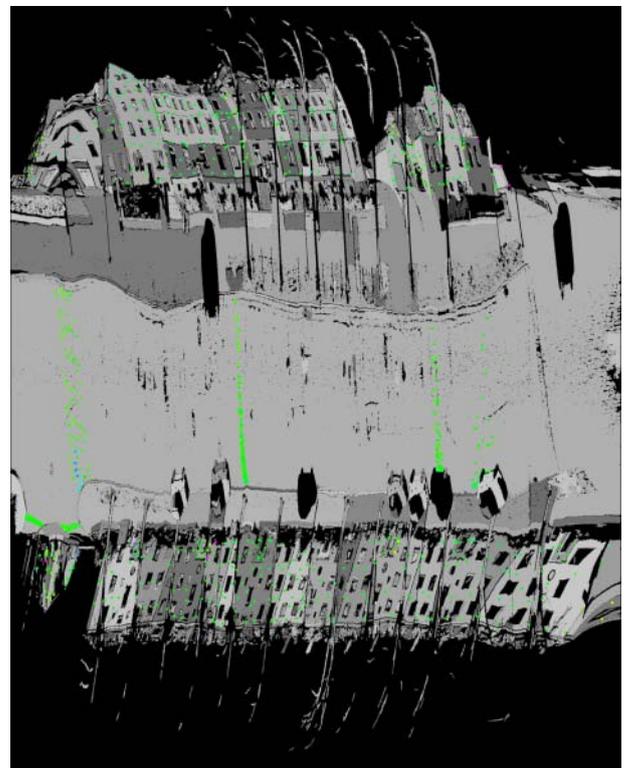
(a) Passpunkte vor



(b) Passpunkte nach



(c) Test vor



(d) Test nach

Abbildung C.3.: Referenz gleichmäßig reduziert: Farbcodierte Residuen vor und nach der Ausgleichung mit 25% der Referenzpunkte für einen Scanstreifen (blau = -5 cm, grün = 0 cm, rot = +5 cm, magenta = Ausreißer).

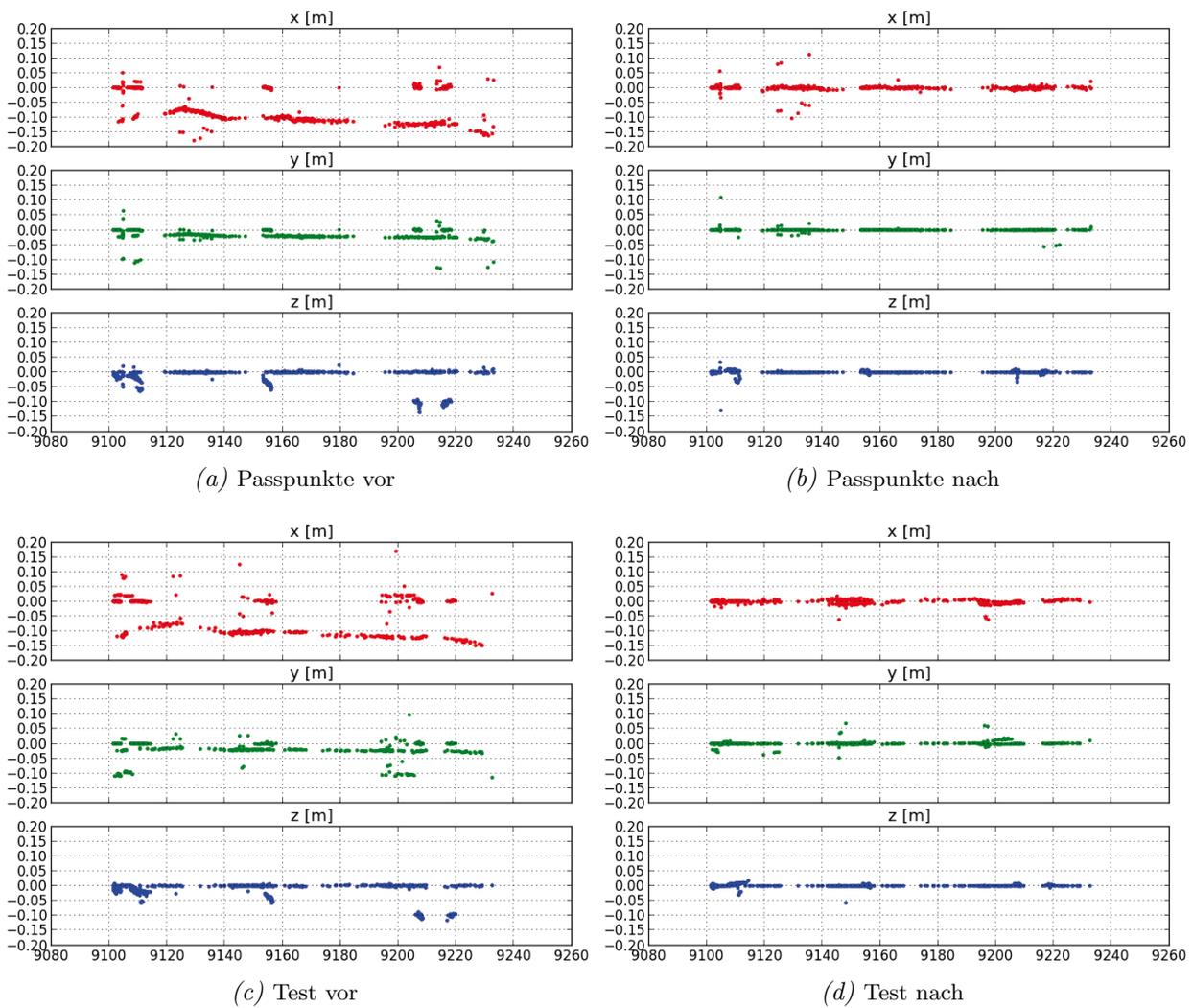
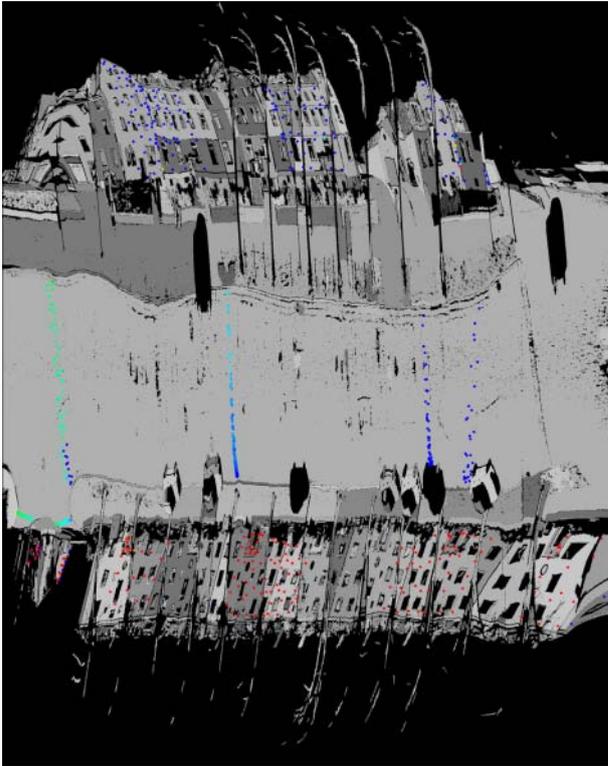
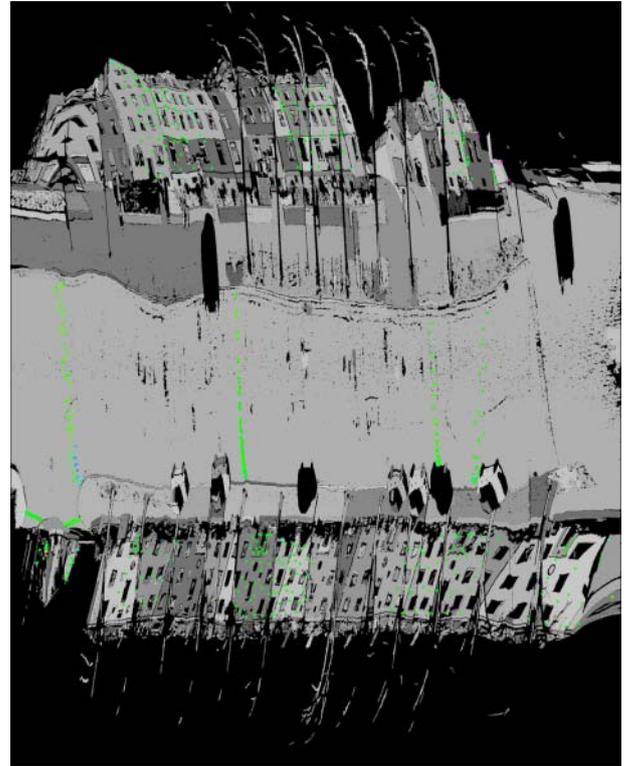


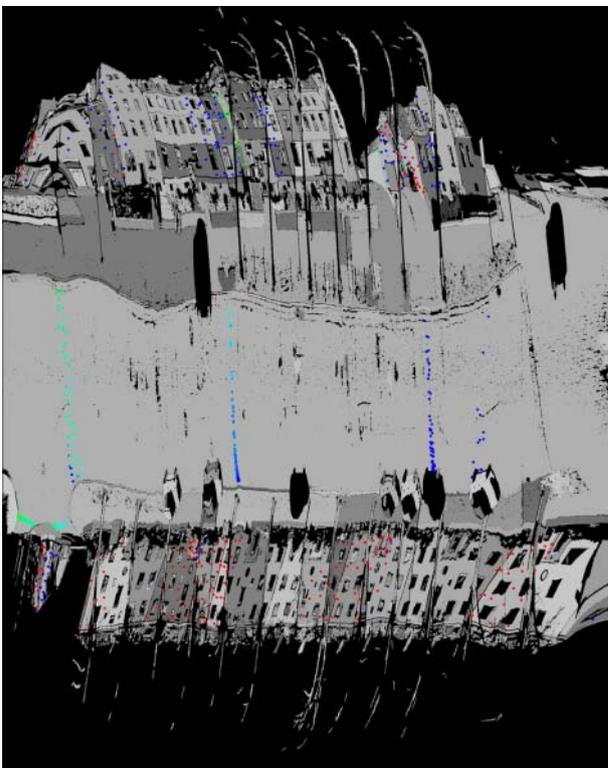
Abbildung C.4.: Referenz in Raster: Verteilung der Beobachtungen bei Verwendung eines 20 m-Rasters, getrennt für x -, y - und z -Richtung für Pass- und Kontrollpunkte vor und nach der Ausgleichung für einen Scanstreifen.



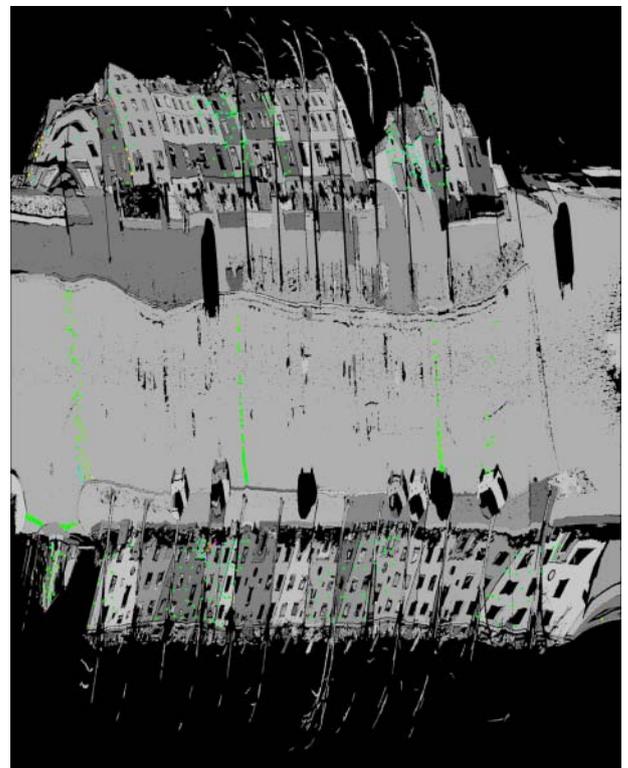
(a) Passpunkte vor



(b) Passpunkte nach



(c) Test vor



(d) Test nach

Abbildung C.5.: Referenz in Raster: Farbcordierte Residuen mit Passpunkten in 20 m-Raster für einen Scanstreifen.

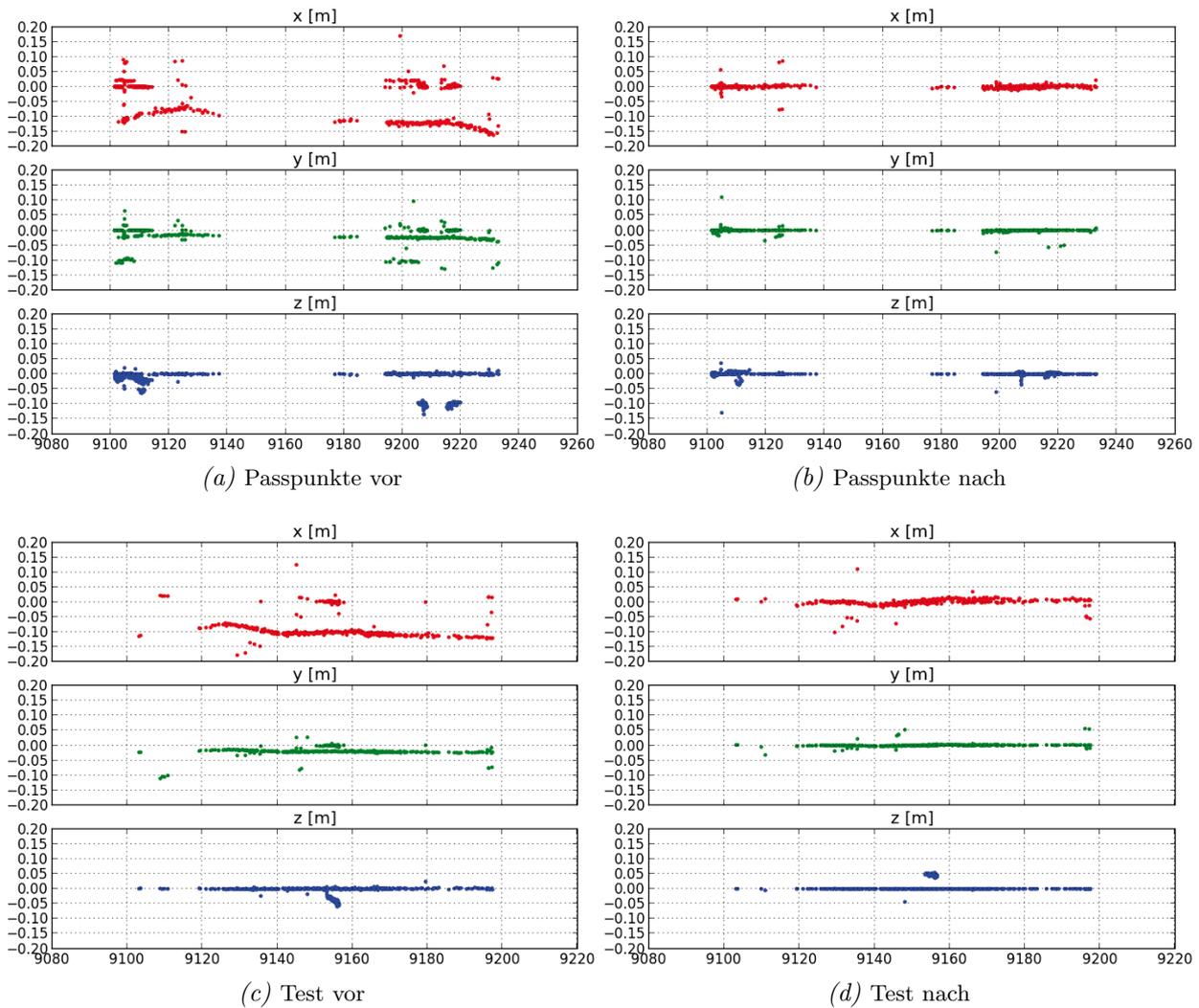


Abbildung C.6.: Referenz an Kreuzung: Verteilung der Pass- und Kontrollpunkte entlang der Trajektorie, getrennt für die x -, y - und z -Komponente der Normalenvektoren vor und nach der Ausgleichung für einen Scanstreifen.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Teilbereiche der Arbeit	10
2.1. Mobile Mapping System RIEGL VMX-250 mit zwei Laserscannern und vier Kameras	25
2.2. Darstellung einer 3D-Punktwolke als Scanstreifen	27
2.3. Punktwolke in 2D- und 3D-Darstellung	27
2.4. Punktwolken unterschiedlicher Epochen für zwei Kacheln	29
2.5. Varianten der Zuordnung korrespondierender Objekte im ICP-Algorithmus	30
2.6. Adaptierter ICP-Algorithmus mit Punkt-zu-Ebene-Korrespondenz	33
2.7. Passpunktkonfigurationen für flugzeugbasierte Systeme	35
2.8. Eigenvektoren für Ebene und Zylinder	38
4.1. Geodätisches Netz mit Standardabweichung der Netzpunkte	54
4.2. Referenzdaten in einem Testgebiet mit Tachymeter erfasst	55
4.3. Vergleich der Gebäudepolygone aus ALKIS mit Testfeld	57
4.4. Histogramm der Distanzen zwischen Referenzdaten und ALKIS	58
4.5. Schematischer Vergleich zwischen Gebäudepolygonen und Punktwolke	58
4.6. Extrapolierte Fassaden aus ALKIS-Grundrissen	59
4.7. Vergleich der ALKIS-Grundrisse mit Fassaden aus Punktwolken	60
4.8. Verteilung von zylindrischen Landmarken entlang einer Trajektorie	61
4.9. Sichtbarkeitsanalyse für Objekte in einem Stereokamerasystem	61
4.10. Fehlerellipsen für simulierte Positionierung mit variablem Öffnungswinkel	63
4.11. Positionierungsgenauigkeit entlang einer Trajektorie	64
4.12. Positionierungsgenauigkeit für Einzelpositionen und mit Filterung	66
5.1. Filterung von geeigneten Punkten für den ICP-Algorithmus	71
5.2. Schematische Verteilung von Normalenvektoren innerhalb einer Kachel	72
5.3. Punktwolke einer Epoche eingefärbt nach Residuen des ICP-Algorithmus	72
5.4. Testgebiet zur Analyse der Datenqualität	73
5.5. Residuen zwischen Punktwolken unterschiedlicher Epochen	74
5.6. Ellipsen der Kofaktormatrizen des ICP-Algorithmus für jede Kachel	76
5.7. Kreisschätzung in Punktwolken getrennt nach Epochen	78
5.8. 3D-Punktwolken einer Stange mit unterschiedlicher Punktdichte	79
5.9. Zylinderschätzung mit Punktnormalen	80
5.10. Segmentierung von Fassaden in einer Punktwolke	81
5.11. Bewertung automatisch segmentierter Zylinder mittels Referenz	82
5.12. Analyse der Segmentierung zur Eliminierung falsch positiver Ergebnisse	83
5.13. Fassadenpunkte und Masten als Referenzobjekte	84
5.14. Punktwolke und tachymetrisch erfasste Referenzebene	86
6.1. Datenerfassung mit zwei Scannern entlang einer Trajektorie	88

6.2. Scangeometrie vor und nach der Korrektur	89
6.3. Aufbau der Normalgleichungsmatrix	92
6.4. Verteilung von Passobjekten für Mobile Mapping Aufnahmen	94
7.1. Trajektorien zur Auswertung mit Referenzdaten	95
7.2. Schematische Verteilung der Referenzdaten im Testgebiet	97
7.3. Referenz vollständig: Histogramme der Residuen vor der Ausgleichung	98
7.4. Referenz vollständig: Farbcodierte Residuen vor der Ausgleichung	99
7.5. Referenz vollständig: Residuen getrennt nach Richtung vor der Ausgleichung	99
7.6. Referenz vollständig: Korrektur der Trajektorie nach der Ausgleichung	100
7.7. Referenz vollständig: Histogramme der Residuen nach der Ausgleichung	101
7.8. Referenz vollständig: Residuen getrennt nach Richtung nach der Ausgleichung	101
7.9. Referenz vollständig: Farbcodierte Residuen nach der Ausgleichung	102
7.10. Referenz vollständig: Histogramme der Residuen für alle Epochen	103
7.11. Referenz reduziert: Histogramme der Residuen vor der Ausgleichung für alle Scanstreifen	104
7.12. Referenz reduziert: Geschätzte Korrektur einer Trajektorie	104
7.13. Referenz reduziert: Histogramme der Residuen nach der Ausgleichung	105
7.14. Referenz in Raster: Histogramme der Residuen für 145 Scanstreifen	106
7.15. Referenz in Raster: Korrektur der Trajektorie mit Referenz in 20 m-Raster	107
7.16. Referenz an Kreuzung: Farbcodierte Residuen vor der Ausgleichung für einen Scanstreifen	108
7.17. Referenz an Kreuzung: Histogramme der Residuen für einen Scanstreifen	109
7.18. Referenz an Kreuzung: Geschätzte Korrektur der Trajektorie	110
7.19. Referenz an Kreuzung: Farbcodierte Residuen nach der Ausgleichung	111
7.20. Referenz an Kreuzung: Histogramme der Residuen für 100 Scanstreifen	112
7.21. Effekt bei ungünstiger Verteilung der Passpunkte	113
7.22. Torsion einer Punktwolke bei einseitiger Verteilung der Referenzpunkte	115
B.1. Referenz vollständig: Histogramm der Residuen vor der Ausgleichung	125
B.2. Referenz vollständig: Residuenvektoren vor der Ausgleichung	125
B.3. Referenz vollständig: Farbcodierte Residuen vor der Ausgleichung	126
B.4. Referenz vollständig: Geschätzte Korrektur der Trajektorie	127
B.5. Referenz vollständig: Histogramm der Residuen nach der Ausgleichung	127
B.6. Referenz vollständig: Residuenvektoren nach der Ausgleichung	127
B.7. Referenz vollständig: Farbcodierte Residuen nach der Ausgleichung	128
C.1. Referenz reduziert: Verteilung der Beobachtungen vor der Ausgleichung bei 75% und 25%	129
C.2. Referenz reduziert: Verteilung der Beobachtungen nach der Ausgleichung bei 75% und 25%	130
C.3. Referenz reduziert: Farbcodierte Residuen mit 25% der Referenzpunkte	131
C.4. Referenz in Raster: Verteilung der Beobachtungen entlang der Trajektorie mit 20 m-Raster	132
C.5. Referenz in Raster: Farbcodierte Residuen mit Referenzdaten in 20 m-Raster	133
C.6. Referenz an Kreuzung: Verteilung der Beobachtungen entlang der Trajektorie	134

Tabellenverzeichnis

4.1. Ausgewählte Objekte der Stadtkarte Hannover	53
5.1. Evaluation der Kachelgröße anhand von Normalenvektoren	75
5.2. Distanzen segmentierter Zylinder zu Referenzobjekten	85
7.1. Referenz vollständig: Ergebnisse vor und nach der Ausgleichung	103
7.2. Referenz reduziert: Ergebnisse für 145 Scanstreifen vor und nach der Ausgleichung	106
7.3. Referenz in Raster: Ergebnisse für 145 ausgewertete Scanstreifen	107
7.4. Referenz an Kreuzung: Ergebnisse für einen ausgewählten Scanstreifen	109
7.5. Referenz an Kreuzung: Ergebnisse für 100 Scanstreifen	111
A.1. Ausgewählte 2D- und 3D-Laserscanner für mobile Anwendungen	121
A.2. Spezifikationen Laserscanner RIEGL VQ-250	122
A.3. Auswahl terrestrischer Mobile Mapping Systeme mit Laserscannern und (optional) Kameras .	123

Literaturverzeichnis

- AdV, 2015. Das AFIS-ALKIS-ATKIS-Modell. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, URL: www.adv-online.de/AAA-Modell/ (Letzter Zugriff: 28.02.2017).
- AdV, 2017. Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS, Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder. URL: www.sapos.de (Letzter Zugriff: 28.02.2017).
- Applanix Corp., 2012. POSPac MMS GNSS-Inertial Tools User Manual.
- AXIO-NET GmbH, 2017. GNSS - präziser Echtzeit-Service. URL: www.axio-net.eu (Letzter Zugriff: 28.02.2017).
- Baarda, W., 1968. A testing procedure for use in geodetic networks. Nr. 5 In New Series 2. Niederländische Geodätische Kommission, Delft.
- Ballard, D. H., Brown, C. M., 1982. Computer Vision. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Baltsavias, E., 1999. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2 - 3), S. 164 – 198.
- Barber, D., Mills, J., Smith-Voysey, S., 2008. Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63 (1), S. 128 – 141, Theme issue: Terrestrial Laser Scanning.
- Bauer, M., 2011. Vermessung und Ortung mit Satelliten. Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Bentley, J. L., 1975. Multidimensional Binary Search Trees Used for Associative Searching. *Commun. ACM* 18 (9), S. 509–517.
- Besl, P. J., McKay, N. D., 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14 (2), S. 239 – 256.
- Borrmann, D., Elseberg, J., Lingemann, K., Nüchter, A., Hertzberg, J., 2008. Globally consistent 3D mapping with scan matching. *Journal of Robotics and Autonomous Systems (JRAS)* 56 (2), S. 130 – 142.
- Brenner, C., 2009. Extraction of Features from Mobile Laser Scanning Data for Future Driver Assistance Systems. In: *Advances in GIScience: Proceedings of 12th AGILE Conference on GIScience, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. S. 25–42.
- Brenner, C., 2016. Scalable Estimation of Precision Maps in a MapReduce Framework. In: *Proceedings of the 24th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*.
- Brenner, C., Hofmann, S., 2010. Evaluation of Automatically Extracted Landmarks for Future Driver Assistance Systems. In: *Proceedings of the Joint International Conference on Theory, Data Handling and Modelling in GeoSpatial Information Science*. Bd. 38. S. 361–366.
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2016. Quasigeoid der Bundesrepublik Deutschland, Die Höhenreferenzfläche der Bundesrepublik Deutschland, GCG2011. Stand der Dokumentation: 28.10.2016, URL: www.geodatenzentrum.de/docpdf/quasigeoid.pdf (Letzter Zugriff: 28.02.2017).
- Cao, J., Yuan, X., Fang, Y., 2016. Tri-Stereo Model Orientation of High-Resolution Satellite Imagery Combining Ground Control Points and Lines. *Journal for Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* 2016/ 3, S. 125–140.

- Chen, Y., Medioni, G., 1991. Object modeling by registration of multiple range images. In: *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Bd. 3. S. 2724–2729.
- Curs, S., Göbel, J., Hinze, S., Harmening, C., Ibershoff, T., Madinejad, T., Ott, T., 2013. Projektseminar Mobile Mapping 2012/2013, Projektbericht, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover, unveröffentlicht.
- Dean, J., Ghemawat, S., 2004. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters. In: *OSDI'04: Sixth Symposium on Operating System Design and Implementation*. San Francisco, CA.
- EDMap, 2004. Enhanced Digital Mapping Project Final Report. URL: https://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/repts_te/14161.htm (Letzter Zugriff: 28.02.2017).
- Eggert, D., Dalyot, S., 2012. Octree-Based SIMD Strategy for ICP Registration and Alignment of 3D Point Clouds. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences I-3*, S. 105–110.
- Eggert, D., Sester, M., 2013. Multi-layer visualization of mobile mapping data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 1 (2)*, S. 73–78.
- El-Sheimy, N., 2005. An Overview of Mobile Mapping Systems. In: *From Pharaos to Geoinformatics, FIG Working Week 2005 and GSDI-8*.
- Ellum, C., El-Sheimy, N., 2002. Land-Based Mobile Mapping Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 68 (1)*, S. 13, 15–17, 28.
- FARO Europe Europe GmbH & Co. KG, 2013. FARO Laser Scanner Focus 3D X 330. URL: www.faro.com (Letzter Zugriff: 28.02.2017).
- Fischler, M. A., Bolles, R. C., 1981. Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analyses and Automated Cartography. *Communications of the ACM 24 (6)*, S. 381–395.
- Floth, M., Korth, W., 2007. Gemeinsame Nutzung von GPS und GLONASS im Satellitenpositionierungsdienst SAPOS. *Vermessung Brandenburg 2 (02/2007)*, S. 67–72.
- France, J., 2014. It's about time. LiDAR News Magazine, Vol. 4 Nr. 5.
- Friess, P., 2006. Toward a rigorous methodology for airborne laser mapping. In: *Proceedings of the International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2006*.
- Gelfand, N., Ikemoto, L., Rusinkiewicz, S., Levoy, M., 2003. Geometrically Stable Sampling for the ICP Algorithm. In: *Proc. International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*.
- Graefe, G., Caspary, W., Heister, H., Klemm, J., Sever, M., 2001. The road data acquisition system MoSES - determination and accuracy of trajectory data gained with the Applanix POS/LV. In: *3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology*. Bd. On CDROM. Cairo, Egypt.
- Grewal, M., Weill, L., Andrews, A., 2007. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. Wiley.
- Gross, M., Pfister, H., 2011. Point-Based Graphics. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics. Elsevier Science.
- Görres, B., Nothnagel, A., 2012. Übergeordnete geodätische Koordinaten in Deutschland heute - Teil 2: Bezugssysteme für Europa. *Allgemeine Vermessungsnachrichten 119*, S. 259–267.
- Haala, N., Peter, M., Kremer, J. and Hunter, G., 2008. Mobile Lidar Mapping for 3D Point Cloud Collection in Urban Areas - A Performance Test. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Habib, A. F., Kersting, A. P., Ruifang, Z., Al-Durgham, M., Kim, C., Lee, D. C., 2008. LiDAR strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips. *Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVII*, S. 385–390.

- Hake, G., Grünreich, D., Meng, L., 2002. Kartographie: Visualisierung raum-zeitlicher Informationen. De Gruyter Lehrbuch. Walter de Gruyter.
- Hofmann, S., Brenner, C., 2016. Accuracy assessment of mobile mapping point clouds using the existing environment as terrestrial reference. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 41, S. 601–608.
- Hofmann, S., Schulze, M. J., Sester, M., Brenner, C., 2011. Quality assessment of landmark based positioning using stereo cameras. In: Stilla, U., Rottensteiner, F., Mayer, H., Jutzi, B., Butenuth, M. (Hrsg.), *PIA11 - Photogrammetric Image Analysis*. Bd. 38, Part 3 / W22 von The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. München, S. 85–90.
- Horn, B., 1987. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America* 4, S. 629–642.
- Huang, Q., Anguelov, D., 2010. High Quality Pose Estimation by Aligning Multiple Scans to a Latent Map. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Anchorage, Alaska, USA.
- Kager, H., 2004. Discrepancies between overlapping laser scanning strips - simultaneous fitting of aerial laser scanner strips. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXV, B/1*. Istanbul, Turkey, S. 555–560.
- Kalman, R. E., 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering* 82, S. 35–45.
- Kilian, J., Haala, N., English, M., 1996. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. In: *IAPRS Vol. 31 Part B3*. S. 383–388.
- Kraus, K., 2004. Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Bd. 7. Auflage. de Gruyter Lehrbuch.
- Kreitlow, S., Brettschneider, A., Jahn, C.-H., Feldmann-Westendorff, U., 2010. ETRS89/UTM - Der Bezugssystemwechsel und die Auswirkungen auf die Geodatennutzung. *Kartographischen Nachrichten* 60 - 4, S. 179–193.
- Kremer, J., Hunter, G., 2007. Performance of the Streetmapper Mobile LIDAR Mapping System in 'Real World' Projects. In: *Photogrammetric Week 2007*. Wichmann, S. 215–225.
- Landeshauptstadt Hannover, 2012. Stadtkarte Hannover 1:1000, Landeshauptstadt Hannover, Fachbereich Planen und Stadtentwicklung, Geoinformation. URL: www.hannover.de (Letzter Zugriff: 28.02.2017).
- Leica Geosystems GmbH, 2016. Datenblatt Nova MS 50, Datenblatt Leica TS 30. URL: www.leica-geosystems.de (letzter Zugriff 28.04.2016).
- LGLN, 2017. Geodatenportal Niedersachsen, Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen. URL: www.geodaten.niedersachsen.de (Letzter Zugriff: 06.03.2017).
- Luhmann, T., 2003. Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Navigation Data Standard (NDS) e.V., 2016. NDS Open Land Model. URL: <https://olm.nds-association.org/#features> (Letzter Zugriff: 28.02.2017).
- Nüchter, A., Elseberg, J., Borrmann, D., 2013. Optimale 3D-Punktwolken aus mobilen Laserscandaten. In: Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.), *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013*. Wichmann Verlag, Jade Hochschule, Oldenburg, S. 186–193.
- Niemeier, W., 2002. Ausgleichsrechnung - eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens. de Gruyter, Berlin.

- Niu, X., Zhang, H., Chiang, K.-W., El-Sheimy, N., 2010. Using Land-Vehicle Steering Constraint to Improve the Heading Estimation of MEMS GPS/INS Georeferencing Systems. In: *The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS Convergence in Geomatics - Shaping Canada's Competitive Landscape*. ISPRS Archives - Volume XXXVIII - Part 1.
- Pandazis, J.-C., 2002. NextMAP: Investigating the future of digital map databases. In: *e-Safety Congress, Lyon*.
- Petit, G., Luzum, B. (Eds.), 2010. IERS Conventions (2010) (IERS Technical Note, 36). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- Petrie, G., 2010. An Introduction to the Technology: Mobile Mapping Systems. *GEOInformatics* issue 1, S. 32–43.
- Puente, I., González-Jorge, H., Riveiro, B., Arias, P., 2012. Accuracy verification of the Lynx Mobile Mapper system. *Optics and Laser Technology* 45, S. 578 – 586.
- Pylvanainen, T., Roimela, K., Vedantham, R., Itaranta, J., Grzeszczuk, R., 2010. Automatic Alignment and Multi-View Segmentation of Street View Data using 3D Shape Prior. In: *Fifth International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT)*. Paris, France.
- Rao, C. R., 1964. The Use and Interpretation of Principal Component Analysis in Applied Research. *The Indian Journal of Statistics, Series A (1961-2002)* 26 (4), S. 329–358.
- Rentsch, M., Krzystek, P., 2009. LiDAR strip adjustment using automatically reconstructed roof shapes. *Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information XXXVIII*, S. 158–164.
- Rieger, P., Studnicka, N., Pfennigbauer, M., Ullrich, A., 2010. Advances in mobile laser scanning data acquisition. In: *FIG congress 2010, Sydney, Australia*.
- Riegl LMS GmbH, 2010. Riegl VQ-250: Technical Documentation, Operating Instructions. Horn, Austria, Version 01/09.
- Riegl LMS GmbH, 2011. RiPROCESS - Software Description and User's Instructions.
- Riegl LMS GmbH, 2012a. Data Sheet - Riegl VMX-250.
- Riegl LMS GmbH, 2012b. Data Sheet - Riegl VQ-250.
- Rusinkiewicz, S., Levoy, M., 2001. Efficient variants of the ICP algorithm. In: *Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings*. S. 145–152.
- Rusu, R. B., Cousins, S., 2011. 3D is here: Point Cloud Library (PCL). In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Shanghai, China.
- Samet, H., 1995. Modern Database Systems: The Object Model, Interoperability, and Beyond. Addison Wesley/ ACM Press, Kap. Spatial Data Structures, S. 361–385.
- Schlichting, A., Brenner, C., 2014a. Genauigkeitsuntersuchung zur Lokalisierung von Fahrzeugen mittels Automotive-Laserscannern. In: *Publikation der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. - Vorträge der 34. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF*.
- Schlichting, A., Brenner, C., 2014b. Localization using automotive laser scanners and local pattern matching. In: *Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*. S. 414–419.
- Schnabel, R., Wahl, R., Klein, R., 2007. Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. *Computer Graphics Forum* 26 (2), S. 214–226.
- Schwarz, K. P., El-Sheimy, N., 1996. Kinematic Multi-sensor Systems For Close Range Digital Mapping, The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. In: *The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) 1996 Congress, Commission V, Working Group III*. Bd. XXXI Part B3. Vienna, Austria, S. 774–784.

- SICK AG, 2009. Product Information: The LD-MRS family - compact laser scanners for outdoor use. URL: www.sick.com (Letzter Zugriff: 28.02.2017).
- SICK AG, 2014. Online-Datenblatt LMS 511-20100 PRO. URL: www.sick.com (Letzter Zugriff 28.10.2014).
- Sukkarieh, S., 2010. Low Cost, High Integrity, Aided Inertial Navigation Systems for Autonomous Land Vehicles. Dissertation, Australian Centre for Field Robotics, Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, The University of Sydney, Sydney, Australien.
- Toschi, I., Rodríguez-Gonzálvez, P., Remondino, F., Minto, S., Orlandini, S., Fuller, A., 2015. Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical methods. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40 (5), S. 245–253.
- Velodyne Acoustics, Inc., 2017. Datenblätter HDL-32E, HDL-64E, VLP-16. URL: www.velodynelidar.com (Letzter Zugriff: 06.03.2017).
- Vennegeerts, H., 2011. Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung für Mobile-Mapping Systeme. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, dgk Reihe C 657, ISBN 978-3-7696-5069-3.
- Vieira, M., Shimada, K., 2005. Surface Mesh Segmentation and Smooth Surface Extraction Through Region Growing. *Computer Aided Geometric Design* 22 (8), S. 771–792.
- von Hinüber, E., 2002. Inertiale Messsysteme mit faseroptischen Kreisel für Fahrdynamik und Topologiedaten-Erfassung. *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift* 104, S. 584–591.
- Vosselman, G., Gorte, B., Sithole, G., Rabbani, T., 2004. Recognising Structure in Laser Scanner Point Clouds. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 46, S. 33–38.
- Vosselmann, G., Maas, H.-G. (Hrsg.), 2010. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing.
- Wendel, J., 2007. Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und inertielle Navigation. Oldenbourg.
- Ziegler, J., Bender, P., Schreiber, M., Lategahn, H., Strauss, T., Stiller, C., Dang, T., Franke, U., Appenrodt, N., Keller, C. G. u. a., 2014. Making bertha drive - an autonomous journey on a historic route. *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE* 6, S. 8–20.
- Zoller + Fröhlich GmbH, 2013. Datenblatt Z+F Profiler 9012. URL: www.zf-laser.com (Letzter Zugriff: 28.02.2017).

Lebenslauf

Persönliche Daten

Sabine Hofmann, geb. Burkhart
geboren am 06. August 1983 in Göppingen

Schulausbildung

1990 -1994 Grundschule: Walther-Hensel-Schule, Göppingen
1994 - 2003 Gymnasium: Freihof-Gymnasium, Göppingen
07/2003 Abitur

Studium

2003 - 2008 Studium der Geodäsie an der Technischen Universität Dresden
10/2008 Abschluss als Diplom-Ingenieurin

Beruf

10/2008 - 03/2009 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden
seit 04/2009 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover

Danksagung

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Kartographie und Geoinformatik an der Leibniz Universität Hannover entstanden.

Ganz besonders danke ich Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Claus Brenner, ohne dessen Ideen es diese Arbeit nicht geben würde. Vielen Dank für die tolle Betreuung, für die Diskussionen zum Thema, die fachliche Unterstützung, die Vorschläge zur Umsetzung und die Motivation während der gesamten Zeit. Danke für die Chance, verschiedene Dinge auszuprobieren und dadurch nicht nur fachlich sondern auch persönlich viel zu lernen.

Vielen Dank den Korreferenten Herrn Prof. Dr. Andreas Nüchter und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Müller für die freundliche Übernahme des Korreferats und die vielen hilfreichen Anregungen zur Arbeit.

Ich danke Frau Prof. Dr.-Ing. Monika Sester sowohl für fachliche Anregungen als auch für die Gelegenheiten an Konferenzen und Weiterbildungen teilzunehmen. Vielen Dank auch für die Möglichkeit, meine Arbeitszeiten flexibel zu gestalten und damit Forschung und Kinder unter einen Hut zu bekommen.

Ich danke dem Hochschulbüro für Chancenvielfalt der Leibniz Universität Hannover für die finanzielle Förderung der Arbeit im Rahmen des „Caroline Herschel Programms“.

Mein Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen für die vielfältige Unterstützung, sei es beim Aufbau des Mobile Mapping Systems, bei Messfahrten, für fachliche Diskussionen oder in netten Kaffeepausen. Ich danke allen Hiwis und meinen FwJ'lern Moritz Wandsleb und Jakob Knauer, die mich während meiner Arbeit bei den unterschiedlichsten Aufgaben in Lehre und Forschung unterstützt haben. Ganz besonders danke ich Birgit Kieler für die herzliche Aufnahme am Institut, die gemeinsame Zeit am ikg und die Unterstützung aus der Ferne.

Nicht zuletzt danke ich von ganzem Herzen meiner Familie, die immer für mich da war. Ein großer Dank geht an meine Schwester Bea für ihr offenes Ohr, für die vielen Telefonate und gemeinsamen Wochenenden und die Unterstützung während der gesamten Zeit. Hannah und Noah, danke, dass ihr mir immer zeigt, was im Leben wichtig ist.

Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover

(Eine vollständige Liste der Wiss. Arb. ist beim Geodätischen Institut, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover erhältlich.)

- | | | |
|---------|--------------------------------|--|
| Nr. 307 | ALRAJHI, Muhammad: | Semi-Automated Procedure for Orthophoto Generation from High Resolution Satellite Imagery (Diss. 2013) |
| Nr. 308 | WANG, Jin: | Towards deformation monitoring with terrestrial laser scanning based on external calibration and feature matching methods (Diss. 2013) |
| Nr. 309 | NAEIMI, Majid: | Inversion of satellite gravity data using spherical radial base functions (Diss. 2013) |
| Nr. 310 | SEATOVIC, Dejan: | Methods for Real-Time Plant Detection in 3-D Point Clouds (Diss. 2013) |
| Nr. 311 | SCHUNERT, Alexander: | Assignment of Persistent Scatterers to Buildings (Diss. 2014) |
| Nr. 312 | GUERCKE, Richard: | Optimization Aspects in the Generalization of 3D Building Models (Diss. 2014) |
| Nr. 313 | ZIEMS, Marcel: | Automatic verification of road databases using multiple road models (Diss. 2014) |
| Nr. 314 | DINI, Gholam Reza: | Toward an automatic solution for updating building databases using high resolution space-borne stereo imaging (Diss. 2014) |
| Nr. 315 | KERSTEN, Tobias: | Bestimmung von Codephasen-Variationen bei GNSS-Empfangsantennen und deren Einfluss auf Positionierung, Navigation und Zeitübertragung (Diss. 2014) |
| Nr. 316 | BISKUPEK, Liliane: | Bestimmung der Erdorientierung mit Lunar Laser Ranging (Diss. 2015) |
| Nr. 317 | STEINER, Christina: | Highspeed Stereo-Endoskopie für eng begrenzte Messvolumina (Diss. 2015) |
| Nr. 318 | BANDIKOVA, Tamara: | The role of attitude determination for inter-satellite ranging (Diss. 2015) |
| Nr. 319 | LIN, Miao: | Regional gravity field recovery using the point mass method (Diss. 2015) |
| Nr. 320 | ZHANG, Lijuan: | Mining GPS-Trajectory Data for Map Refinement and Behavior Detection (Diss. 2015) |
| Nr. 321 | ZADDACH, Sebastian: | Zum Beitrag Bayesscher Schätzverfahren in der Vergleichswertermittlung (Diss. 2016) |
| Nr. 322 | SMYRNAIOS, Marios: | Carrier-phase Multipath in Satellite-based Positioning (Diss. 2016) |
| Nr. 323 | MENZE, Moritz: | Object Scene Flow (Diss. 2016) |
| Nr. 324 | WU, Hu: | Gravity field recovery from GOCE observations (Diss. 2016) |
| Nr. 325 | XU, Xiangyang: | Terrestrial Laser Scanning for the Generation and Calibration of Finite Element Models (Diss. 2016) |
| Nr. 326 | SAYYAD, Muhammad Naem Shahzad: | Joint use and mutual control of terrestrial laser scans and digital images for accurate 3D measurements (Diss. 2016) |
| Nr. 327 | SCHACK, Lukas: | Object-based matching of Persistent Scatterers to Optical Oblique Images (Diss. 2016) |
| Nr. 328 | REICH, Martin: | Global Image Orientation from Pairwise Relative Orientations (Diss. 2016) |
| Nr. 329 | KLINGER, Tobias: | Probabilistic multi-person localisation and tracking (Diss. 2016) |
| Nr. 330 | SCHMIDT, Alena: | Markierte Punktprozesse für die automatische Extraktion von Liniennetzen in Rasterdaten (Diss. 2016) |
| Nr. 331 | HOFMANN, Franz: | Lunar Laser Ranging - verbesserte Modellierung der Monddynamik und Schätzung relativistischer Parameter (Diss. 2017) |
| Nr. 332 | BRIEDEN, Phillip: | Validierung von GOCE-Gravitationsgradienten in Kreuzungspunkten und Zukunftsperspektiven der Satellitengradiometrie (Diss. 2017) |
| Nr. 333 | VON GÖSSELN, Ilka: | Simulationsbasierte Effizienzoptimierung von Messprozessen am Beispiel der tachymetrischen Netzmessung (Diss. 2017) |
| Nr. 334 | HOFMANN, Sabine: | Potential von LiDAR Mobile Mapping für hochgenaue Karten (Diss. 2017) |

Die Arbeiten werden im Rahmen des wissenschaftlichen Schriftenaustausches verteilt und sind nicht im Buchhandel erhältlich. Der Erwerb ist zu einem Stückpreis von € 25,00 bei den herausgebenden Instituten möglich.

