DGK Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 921

Erik Edmund Heinz

Beiträge zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning

München 2024

Bayerische Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5333-5

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
bonndoc – Publikationsserver der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
https://hdl.handle.net/20.500.11811/8887 oder https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5-60903, Bonn 2021

DGK Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C Dissertationen Heft Nr. 921

Beiträge zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning

An der Landwirtschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegte Dissertation

von

Erik Edmund Heinz, M.Sc.

München 2024

Bayerische Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5333-5

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:

bonndoc – Publikationsserver der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
https://hdl.handle.net/20.500.11811/8887 oder https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5-60903, Bonn 2021

Adresse der DGK:



Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

Alfons-Goppel-Straße 11 ● D – 80 539 München

Telefon +49 – 331 – 288 1685 ● E-Mail post@dgk.badw.de

http://www.dgk.badw.de

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann

Korreferenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann (Leibniz Universität Hannover)

Tag der mündlichen Prüfung: 05. November 2020

© 2024 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

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5333-5

Beiträge zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning

Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat die Nutzung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning zunehmend an Bedeutung gewonnen. Dies zeigt sich durch die wachsende Anzahl am Markt verfügbarer Systeme und die sich stetig erweiternden Anwendungsfelder in den Bereichen Kartierung, Bestandserfassung und Monitoring. Aufgrund der gestiegenen Operationalität derartiger Systeme, rückt die Frage nach der Qualität der Daten – vor allem in Hinblick auf die Genauigkeit der erfassten Punktwolken – verstärkt in den Fokus.

Die vorliegende Dissertation konzentriert sich auf bodengebundene Multisensorsysteme im Outdoor-Bereich, die zur Objektraumerfassung einen Profillaserscanner und zur Trajektorienbestimmung eine GNSS/IMU-Einheit nutzen. Solchen Systemen liegt eine komplexe Verarbeitungskette zugrunde, in der viele Abweichungsquellen existieren, die Einfluss auf die Genauigkeit der Punktwolke haben. Abweichungen entstehen bei der Objektraumerfassung, der Systemkalibrierung, der Zeitsynchronisierung und der Trajektorienschätzung. Dies macht eine durchgreifende Qualitätsanalyse sehr herausfordernd. Der Weg einer Vorwärtsmodellierung zur Bestimmung der Genauigkeit der Punktwolke verschließt sich meist, da das funktionale und stochastische Modell der Verarbeitungskette häufig nicht vollständig bekannt ist. In der Praxis wird die Genauigkeit daher in der Regel empirisch auf Grundlage der gemessenen Punktwolke bestimmt, z. B. durch Wiederholungsmessungen oder Vergleiche mit Referenzwerten. Eine Rückwärtsmodellierung ist aufgrund des lückenhaften Modellwissens jedoch auch hier schwierig. Folglich lässt sich die Qualitätsanalyse kinematischer Laserscanningsysteme als nicht vollständig gelöste Problemstellung identifizieren. Aufgrund der Komplexität der Verarbeitungskette ist die umfassende Lösung dieser Problemstellung als langfristiger Prozess einzustufen. Diese Dissertation zielt darauf ab, durch gezielte Beiträge diesen Prozess konstruktiv mitzugestalten:

- Es wird eine Methodik entwickelt, um intensitätsbasierte stochastische Modelle für die Distanzmessung von Profillaserscannern abzuleiten. In diesem Kontext wird auch die Präzision der Distanzmessung im Nahbereich < 20 m genauer analysiert, da man bei kinematischen Laserscanningsystemen häufig mit kurzen Zielweiten konfrontiert ist. Aufgrund von Defokussierungs- und Abschattungseffekten in der Laseroptik ist im Nahbereich mit erhöhtem Messrauschen zu rechnen. Diese Analysen tragen zur verbesserten stochastischen Modellierung und Bewertung kinematischer Laserscanningsysteme bei. Dies wird am Beispiel einer Straßenzustandserfassung demonstriert.
- Die Methodik der Konfigurationsanalyse, wie sie aus der geodätischen Netzausgleichung bekannt ist, wird auf die ebenenbasierte Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit übertragen. Auf diese Weise wird eine Ebenenanordnung abgeleitet, die eine genaue, zuverlässige und sensitive Schätzung der Kalibrierparameter mit möglichst geringen Korrelationen ermöglicht. Auf Basis der Konfigurationsanalyse wird ein dauerhaft installiertes Kalibrierfeld im Outdoor-Bereich realisiert, das eine schnelle und weitestgehend automatisierte Kalibrierprozedur implementiert. Dadurch lässt sich die Qualität der Kalibrierung theoretisch und empirisch durchgreifend beurteilen und sichern.
- Es werden punkt-, flächen- und parameterbasierte Evaluierungsstrategien für kinematische Laserscanningsysteme erprobt sowie deren Vor- und Nachteile beleuchtet. Die Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme ist bisher nicht standardisiert und Einrichtungen zur Evaluierung sind nur in begrenztem Maße vorhanden. Daher wird eine dauerhaft installierte Evaluierungseinrichtung im Outdoor-Bereich aufgebaut, die aus Kontrollpunkten und TLS-Referenzpunktwolken besteht. In dieser Einrichtung ist eine getrennte Evaluierung von Lage- und Höhengenauigkeit möglich. Ferner können einzelne Systemkomponenten (z. B. die Systemkalibrierung) genauer analysiert werden.

Die Beiträge und Untersuchungen der vorliegenden Dissertation tragen zu einer verbesserten Qualitätsanalyse und -sicherung kinematischer Laserscanningsysteme bei. Vor diesem Hintergrund leistet die Dissertation einen wichtigen Beitrag, um den oben angesprochenen, langfristigen Prozess progressiv voranzutreiben.

Contributions to the Calibration and Evaluation of Multi Sensor Systems for Kinematic Laser Scanning

Abstract

In recent years, the utilization of multi sensor systems for kinematic laser scanning has become increasingly popular. Clearly, this trend is confirmed by the growing number of commercially available systems and the constantly expanding fields of application in the context of mapping, inventory, and monitoring. Due to the improved operationality of the related systems, the issue of data quality – especially in terms of the accuracy of the measured point clouds – is frequently raised and has become a relevant topic.

This dissertation focuses on ground-based outdoor systems that make use of a 2D laser scanner for sensing objects and a GNSS/IMU-unit for estimating the trajectory of the platform. Such systems are based on a complex processing chain. In this processing chain many error sources exist that affect the accuracy of the point cloud, i. e., the process of sensing an object with the 2D laser scanner, the system calibration, the time synchronization and the trajectory estimation. Consequently, quality analysis is very challenging. In most cases, the strategy of forward modeling for determining the accuracy of the point cloud cannot be used, since the functional and stochastic model of the processing chain is often not completely known. Thus, in practice, the accuracy is usually determined empirically on the basis of the measured point cloud, e. g., by repeated measurements or comparisons with reference values. However, backward modeling is difficult as well due to the inadequately known functional and stochastic model. This leads to the conclusion that the problem of quality analysis of kinematic laser scanning systems is not completely solved, yet. Due to the complexity of this problem, the solution to this problem seems to be a long-term process. Thus, the goal of this dissertation is to contribute to this process by the following contributions:

- A methodology for determining intensity-based stochastic models for the distance measurements of 2D laser scanners is derived. In this respect, also the precision of distance measurements in the close range < 20 m is analyzed in more detail, because kinematic laser scanning systems are frequently faced with short measuring distances. Due to defocusing and shadowing effects in the laser optics increased measurement noise is expected in the close range. These investigations contribute to an improved stochastic modeling and evaluation of kinematic laser scanning systems. This is demonstrated using the example of a road condition survey.
- The methodology of configuration analysis, as known from geodetic network adjustment, is applied to the plane-based calibration of the lever arm and the boresight angles between a 2D laser scanner and a GNSS/IMU-unit. In this way, a plane setup is derived that allows for an accurate, reliable and sensitive estimation of the calibration parameters with small correlations. Based on the configuration analysis, a permanently installed calibration field is realized outdoors, implementing a fast and mostly automated calibration procedure. In this way, the quality of the calibration can be evaluated and assured both theoretically and empirically.
- Point-based, area-based and parameter-based evaluation methods for kinematic laser scanning systems are tested and their advantages and disadvantages are discussed. Yet, the evaluation of kinematic laser scanning systems has not been standardized and facilities for evaluation purposes are only available to a limited extent. Therefore, a permanently installed evaluation environment is realized outdoors, consisting of a network of control points and TLS reference point clouds. In this environment, a separate evaluation of position and height accuracy is possible. Furthermore, individual system components (e. g., the system calibration) can be examined in more detail.

The contributions and investigations of this dissertation contribute to an improved quality analysis and quality assurance of kinematic laser scanning systems. In the light of this, this dissertation makes an important contribution to progressively advance the long-term process mentioned above.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **1**

1 Einleitung **3**

1.1 Motivation . . . 3

1.2 Zielsetzungen . . . 5

2 Wissenschaftlicher Kontext **9**

2.1 Qualitätsanalyse von Laserscannern . . . 9

2.2 Kalibrierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning . . . 11

2.3 Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning . . . 15

3 Grundlagen **19**

3.1 Bezugssysteme und Georeferenzierungsgleichung . . . 19

3.2 Unsicherheitsbudget beim Laserscanning . . . 24

3.3 Allgemeinfall der Ausgleichung . . . 27

3.4 Qualitätsmaße in der Ausgleichung . . . 29

4 Zusammenfassungen der relevanten Publikationen **33**

5 Hauptaspekte **41**

5.1 Aufbau verschiedener Multisensorsysteme für kinematisches Laserscanning . . . 41

5.1.1 Leichtes, tragbares low-cost Laserscanningsystem . . . 41

5.1.2 Fahrzeuggetragenes Mobile Mapping System . . . 43

5.2 Aufbau einer Kalibrier- und Evaluierungseinrichtung für kinematische Laserscanningsysteme . 44

5.2.1 Referenzfestpunktfeld . . . 44

5.2.2 TLS-Referenzpunktwolken . . . 45

5.2.3 Ebenenbasiertes Kalibrierfeld . . . 46

5.3 Bestimmung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen für Profillaserscanner . . . 47

5.3.1 Entwicklung einer Methodik für Profillaserscanner . . . 47

5.3.2 Anwendung der Methodik auf den Z+F Profiler 9012A . . . 48

5.3.3 Anwendung der Methodik auf den Hokuyo UTM-30LX-EW . . . 51

5.3.4 Anwendung der Modelle im Bereich Straßenzustandserfassung 52
5.3.5 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse 53
5.4 Ebenenbasierte Systemkalibrierung für kinematische Laserscanningsysteme 54
5.4.1 Ebenenbasiertes Kalibrierverfahren 54
5.4.2 Konfigurationsanalyse für die Ebenenanordnung 57
5.4.3 Anwendung auf das fahrzeuggetragene Mobile Mapping System 63
5.4.4 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse 67
5.5 Evaluierungsansätze für kinematische Laserscanningsysteme 68
5.5.1 Punktbasierte Verfahren 68
5.5.2 Flächenbasierte Verfahren 70
5.5.3 Parameterbasierte Verfahren 75
5.5.4 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse 77

6 Weiterführende Betrachtungen 79
6.1 Ausbau der Evaluierungseinrichtung 79
6.2 Ebenenbasierte Kalibrierung von Kameras 83
6.3 Entropiebasierte Kalibrierung von Laserscannern 84

7 Fazit und Ausblick 85

8 Auflistung weiterer Publikationen 89

Abbildungsverzeichnis 91

Tabellenverzeichnis 95

Abkürzungsverzeichnis 97

Literaturverzeichnis 99

Vorwort

Die vorliegende kumulative Dissertation umfasst methodische Beiträge und Untersuchungen zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning. Basierend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurde am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn eine Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning aufgebaut. Dieser Dissertation liegen fünf wissenschaftlich begutachtete Publikationen zugrunde:

- **Publikation A** (peer-reviewed):
  Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2015). Development, Calibration and Evaluation of a Portable and Direct Georeferenced Laser Scanning System for Kinematic 3D Mapping. *Journal of Applied Geodesy*, 9(4), 227–243, doi.org/10.1515/jag–2015–0011

- **Publikation B** (peer-reviewed):
  Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2017). Analysis of different reference plane setups for the calibration of a mobile laser scanning system. In *Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 17 – Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich* (pp. 131–145). Wichmann Verlag, Berlin, hdl.handle.net/20.500.11811/1352

- **Publikation C** (peer-reviewed):
  Heinz, E., Mettenleiter, M., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2018c). Strategy for Determining the Stochastic Distance Characteristics of the 2D Laser Scanner Z+F Profiler 9012A with Special Focus on the Close Range. *Sensors*, 18(7), 2253, doi.org/10.3390/s18072253

- **Publikation D** (peer-reviewed):
  Heinz, E., Eling, C., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2020a). On the applicability of a scan-based mobile mapping system for monitoring the planarity and subsidence of road surfaces - Pilot study on the A44n motorway in Germany. *Journal of Applied Geodesy*, 14(1), 39–54, doi.org/10.1515/jag–2019–0016

- **Publikation E** (peer-reviewed):
  Heinz, E., Holst, C., Kuhlmann, H., & Klingbeil, L. (2020b). Design and Evaluation of a Permanently Installed Plane-Based Calibration Field for Mobile Laser Scanning Systems. *Remote Sensing*, 12(3), 555, doi.org/10.3390/rs12030555

Der Autor der vorliegenden Dissertation hat in jeder der fünf Publikationen den Hauptbeitrag geleistet und den wissenschaftlichen Fortschritt eigenständig erbracht. Darüber hinaus sind im Rahmen dieser Dissertation am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn zwei verschiedene Multisensorsysteme für kinematisches Laserscanning entstanden, welche in den Publikationen A, B, D und E zum Einsatz kommen. Der Autor hat an der Entwicklung dieser Multisensorsysteme maßgeblich mitgewirkt.

In der vorliegenden Dissertation werden die Bezeichnungen *Multisensorsystem für kinematisches Laserscanning*, *kinematisches Laserscanningsystem* und *Mobile Mapping System* weitestgehend synonym verwendet. Gleiches gilt für die Begriffe *kinematisches Laserscanning* und *mobiles Laserscanning*. Mit dem Begriff *Laserscanner* sind in der Regel *Profillaserscanner* gemeint.

1. Einleitung

In den letzten Jahren hat die Nutzung kinematischer Multisensorsysteme zur dreidimensionalen Erfassung unserer Umwelt zunehmend an Bedeutung gewonnen. Das Funktionsprinzip kinematischer Multisensorsysteme basiert darauf, dass Sensoren zur Objektraumerfassung – z. B. Laserscanner oder Kameras – auf einer sich bewegenden Trägerplattform – z. B. Fahrzeuge, Flugzeuge, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), Schiffe, Roboter, Trolleys oder Personen – befestigt werden und die Umgebung aus der Bewegung heraus in Form einer Punktwolke dreidimensional erfassen. Gleichzeitig befinden sich auf der Trägerplattform weitere Sensoren, die die Trajektorie der Plattform in Form von Position und Orientierung bestimmen und so eine Georeferenzierung der Punktwolke in einem übergeordneten Bezugssystem ermöglichen. Im Outdoor-Bereich werden zur Georeferenzierung häufig GNSS (Global Navigation Satellite Systems), IMUs (Inertial Measurement Units) und Odometer genutzt, deren Beobachtungen in einem Filteransatz fusioniert werden [Kuhlmann & Klingbeil, 2017]. Im Indoor-Bereich lässt sich GNSS durch zielverfolgende Tachymeter oder Lasertracker ersetzen [Neitzel & Neumann, 2013]. Ferner besteht die Möglichkeit, die objektraumerfassenden Sensoren über Bündelblockausgleichung, visuelle Odometrie, Scan-Matching oder SLAM-Verfahren (Simultaneous Localization and Mapping) an der Positions- und Orientierungsschätzung zu beteiligen. Dies unterliegt insbesondere in der Photogrammetrie und der Robotik aktiver Forschung [Heipke, 2017; Stachniss, 2017]. Es wird deutlich, dass kinematische Multisensorsysteme in Hinblick auf Trägerplattform, Sensorik und Auswertetechnik sehr vielfältig sind. Vor diesem Hintergrund konzentriert sich die vorliegende Dissertation auf bodengebundene Outdoor-Systeme, die zur Objektraumerfassung einen Profillaserscanner und für die Positions- und Orientierungsbestimmung der Trägerplattform eine GNSS/IMU-Einheit nutzen. Solche Systeme werden häufig als Mobile Mapping Systeme bzw. kinematische Laserscanningsysteme bezeichnet [Puente et al., 2013].

Dass kinematische Multisensorsysteme insbesondere auch in der Geodäsie immer bedeutender werden, zeigt sich dadurch, dass viele Hersteller geodätischer Messinstrumente inzwischen voll operationelle Systeme am Markt anbieten und auf Leitmessen, wie z. B. der INTERGEO®, die kinematische Objektraumerfassung seit Jahren eines der beherrschenden Themen ist. Darüber hinaus existieren vielfältige Anwendungsfelder für kinematische Multisensorsysteme: Erfassung von Straßen und Gebäuden zum Zwecke der Dokumentation, Modellierung und Planung (z. B. für BIM – Building Information Modeling), Bestimmung von Lichtraumprofilen, Monitoring von Infrastrukturobjekten (z. B. Brücken, Tunnel, Stützmauern oder Straßenoberflächen), Überwachung von Erd- und Rutschhängen, oder die Kartierung von Objekten des Straßenraums (z. B. Straßenlaternen, Schilder, Kanaldeckel, Bordsteinkanten oder Fahrbahnmarkierungen). In der Literatur finden sich diesbezüglich zahlreiche Publikationen und Reviews (siehe z. B. Williams et al. [2013]; Guan et al. [2016]; Gargoum & El Basyouny [2019]; Soilán et al. [2019] oder Wang et al. [2019]).

1.1 Motivation

Die vermehrte Nutzung von kinematischen Multisensorsystemen hat in der Ingenieurgeodäsie zu einem Paradigmenwechsel geführt. So erfolgt die Erfassung von Objekten und Vorgängen nicht länger in Form sorgfältig ausgewählter Einzelpunkte, wie dies bei klassischen geodätischen Messverfahren wie z. B. Tachymetrie oder Nivellement der Fall ist, sondern flächenhaft durch eine Punktwolke. Darüber hinaus ist das Messsystem während der Messung nicht länger statisch, sondern es bewegt sich [Kuhlmann et al., 2014]. Neben einer Vielzahl von Vorteilen wie Effizienzsteigerung und raumkontinuierlicher Erfassung, stellt die kinematische Datenerfassung aber auch erhöhte Anforderungen an den Mess- und Auswerteprozess. Hinsichtlich der Auswertung von Punktwolken muss verstärkt in Modellierung, Automatisierung und Interpretation der Messdaten investiert werden. Beim Messvorgang sind viele Sensoren in korrekter Weise zu fusionieren. Darüber hinaus sind Aussagen zur Qualität der Messwerte sowie daraus abgeleiteter Produkte – für den Geodäten vor allem in Hinblick auf Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Sensitivität – essentiell. Obwohl die Beurteilung und Sicherung der Qualität zu den geodätischen Kernkompetenzen zählen [Kuhlmann et al., 2014], stößt man bei kinematischen Multisensorsystemen auf Herausforderungen, die eine durchgreifende Qualitätsanalyse anspruchsvoll machen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass man sich bei kinematischen Multisensorsystemen bereits während des

Messvorgangs mit einer komplexen und ineinandergreifenden Verarbeitungskette konfrontiert sieht. In dieser Verarbeitungskette existieren viele Faktoren, die Einfluss auf die Genauigkeit der Punktwolke haben. Dazu zählen Beobachtungsabweichungen der Sensoren, Abweichungen in der Systemkalibrierung (d. h. Hebelarme und Boresight-Winkel, die die gegenseitige Einbaulage der Sensoren auf der Trägerplattform beschreiben), Abweichungen in der zeitlichen Synchronisierung der Sensoren, sowie Modellfehler bei der Sensordatenfusion zur Schätzung der Position und Orientierung der Trägerplattform. Der anschließende Auswerteprozess auf Basis der Punktwolken erhöht die Komplexität zusätzlich und macht kinematische Multisensorsysteme häufig zu einer Black-Box, bei der sich der Aufbau, die Funktionsweise und das Zusammenspiel der einzelnen Systemkomponenten für den Nutzer nicht immer vollständig erschließen (siehe z. B. Hennes & Heister [2007]; Kuhlmann & Klingbeil [2017] oder Woschitz & Heister [2017]).

Eine Möglichkeit zur Analyse der Genauigkeit kinematischer Multisensorsysteme besteht darin, eine Vorwärtsmodellierung durchzuführen, indem man basierend auf dem funktionalen Modell der Verarbeitungskette stochastische Verteilungsfunktionen für die Einzelgrößen (Beobachtungen und Kalibrierparameter) einführt, um über Varianzfortpflanzung (siehe z. B. Glennie [2007]; Mezian et al. [2016]; Mattheuwsen et al. [2019] oder Stenz et al. [2020]) oder Monte-Carlo-Simulationen (siehe z. B. Alkhatib & Kutterer [2013] oder Paffenholz et al. [2017]) die Genauigkeit der Punktwolke zu ermitteln.[1] Aufgrund der komplexen Verarbeitungskette verschließt sich dieser Weg aber meist, da das funktionale Modell zumindest in Teilen unbekannt ist. Darüber hinaus sind auch die stochastischen Verteilungsfunktionen der Einzelgrößen oft nicht bekannt oder normalverteilt und zudem zeitlich und räumlich variabel. Am deutlichsten ist dies bei GNSS, da in Abhängigkeit der Satellitenkonstellation und der Umgebungsbedingungen aufgrund variierender systematischer Abweichungen große Unterschiede in der Genauigkeit auftreten können. Dies führt dazu, dass sich je nach Anwendung Punktwolken mit unterschiedlicher Genauigkeit ergeben können, selbst wenn das gleiche Multisensorsystem verwendet wird. Dies bedeutet jedoch nicht, dass eine Vorwärtsmodellierung zur Analyse der Genauigkeit kinematischer Multisensorsysteme vollkommen ungeeignet ist. Dies zeigen Stenz et al. [2020] anhand eines kinematischen Laserscanningsystems im Indoor-Bereich, das über einen Lasertracker extern referenziert wird. Die Vorwärtsmodellierung über Varianzfortpflanzung ist für diesen Fall praktikabel, da das funktionale und stochastische Modell des Systems deutlich besser abgeschätzt werden kann, als dies bei anderen Systemen – z. B. einem Outdoor-System mit GNSS/IMU-Integration – der Fall ist.

Eine vielversprechendere Methode zur Analyse der Genauigkeit stellt die Rückwärtsmodellierung auf Grundlage der gemessenen Punktwolken dar. Dabei werden die Punktwolken zu Referenzwerten in Beziehung gesetzt (siehe z. B. Paffenholz et al. [2017] oder Stenz et al. [2017, 2020]). Die Abweichungen zur Referenz spiegeln die Genauigkeit des Gesamtsystems wider. Aus Wiederholungsmessungen lassen sich zudem Aussagen zur Präzision ableiten. Eine Rückführung der Abweichungen auf einzelne Bestandteile der Verarbeitungskette ist aufgrund des lückenhaften Modellwissens jedoch schwierig; unter anderem auch deshalb, weil unterschiedliche Abweichungsquellen zu ähnlichen Abweichungen in der Punktwolke führen können. So verursachen Abweichungen in den Orientierungswinkeln der Trajektorie in der Punktwolke ähnliche Abweichungen wie eine fehlerhafte Boresight-Kalibrierung. Die Problematik der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Genauigkeit in Abhängigkeit der Beobachtungsbedingungen gilt bei der empirischen Genauigkeitsanalyse genau wie bei den theoretischen Betrachtungen im Rahmen einer Vorwärtsmodellierung.

Anhand der bisherigen Ausführungen können die Beurteilung und Sicherung der Qualität kinematischer Multisensorsysteme als nicht vollständig gelöste Fragestellungen identifiziert werden. Dies stellt insbesondere für sicherheitskritische Anwendungen aus den Bereichen Monitoring und Überwachung ein schwerwiegendes Problem dar. Unter dem Begriff Qualität werden im Rahmen dieser Dissertation die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Punktwolke als Ergebnis des Messprozesses kinematischer Multisensorsysteme verstanden. Andere Qualitätskriterien, wie z. B. Vollständigkeit, Aktualität oder Einheitlichkeit der Daten, werden nicht betrachtet. Auch auf die Auswertung der Punktwolken – z. B. in Form von Modellierungen – wird nur eingeschränkt eingegangen. Aufgrund der Komplexität der Fragestellung ist die vollständige Lösung der Qualitätsbeurteilung und -sicherung bei kinematischen Multisensorsystemen als ein langfristiger Prozess einzustufen. Diese Dissertation zielt darauf ab, gezielte Beiträge zur Lösung dieser Fragestellung beizusteuern. Diesbezüglich werden nachfolgend die Zielsetzungen der Dissertation konkretisiert.

[1] Eine allgemeine Diskussion zur Qualitätsbewertung von Messungen und daraus abgeleiteter Größen findet sich z. B. in Schwarz & Hennes [2017].

1.2 Zielsetzungen

Die Zielsetzungen der vorliegenden Dissertation lassen sich anhand des Schaubildes in Abb. 1.1 erläutern, welches die komplexe Verarbeitungskette eines kinematischen Laserscanningsystems vereinfacht in die Komponenten Objektraumerfassung, Systemkalibrierung, Zeitsynchronisierung und Trajektorienschätzung unterteilt. Am Ende des Messprozesses steht eine dreidimensionale Punktwolke. Da der Laserscanner bei den im Rahmen dieser Dissertation betrachteten Systemen nicht an der Trajektorienbestimmung teilnimmt, ergibt sich sogar eine strikte Trennung von Objektraumerfassung und Trajektorienschätzung.

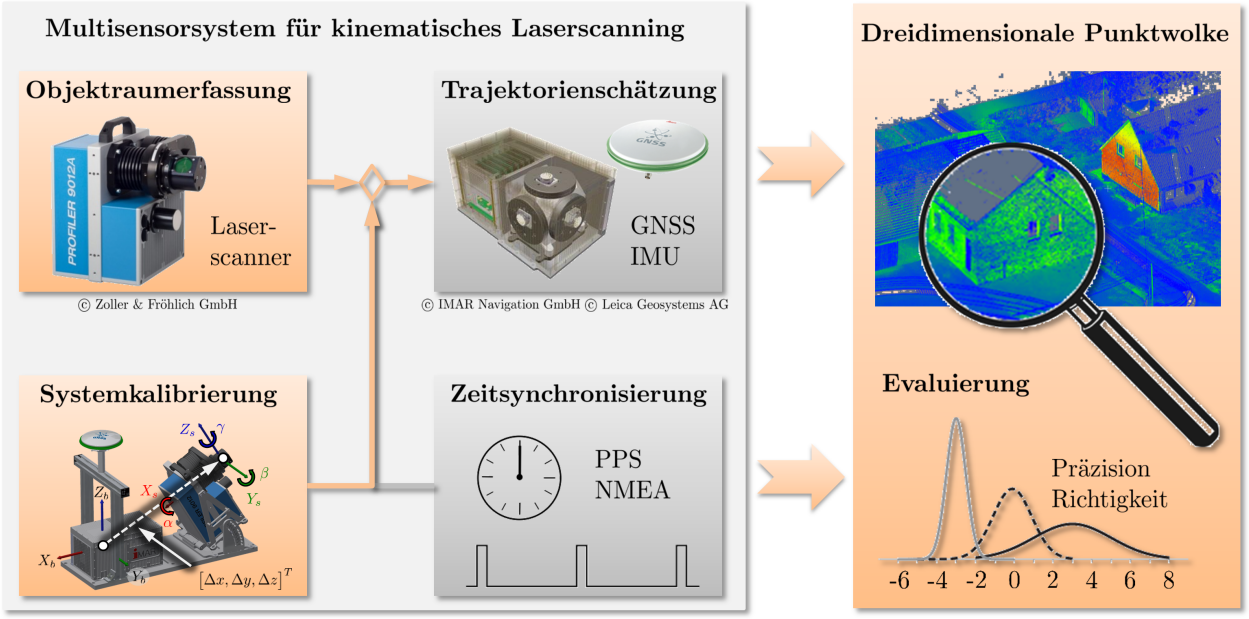


Abbildung 1.1: Verarbeitungskette eines Multisensorsystems für kinematisches Laserscanning zur Generierung einer Punktwolke. Die vorliegende Dissertation widmet sich den orange hinterlegten Teilaspekten.

Diese Dissertation konzentriert sich auf die in Abb. 1.1 orange hinterlegten Teilaspekte der Verarbeitungskette: Objektraumerfassung mittels Laserscanning, Systemkalibrierung zwischen dem Laserscanner und der GNSS/IMU-Einheit (Hebelarm und Boresight-Winkel) sowie Evaluierung der Punktwolke als Endprodukt des Messvorgangs. Die Trajektorienschätzung wird nicht im Detail behandelt, sondern als Black-Box Komponente genutzt. Gleiches gilt für die Zeitsynchronisierung zwischen den Sensoren. Um die Qualität des Gesamtsystems auf Basis der Evaluierung der Punktwolke (Abb. 1.1, rechts) beurteilen und verbessern zu können, sind auch die einzelnen Schritte der Verarbeitungskette zu betrachten. Dabei liegt der Fokus dieser Dissertation mit der Objektraumerfassung und der Systemkalibrierung auf dem Anfang der Verarbeitungskette (Abb. 1.1, links). Insgesamt ergeben sich folgende Zielsetzungen:

1. **Stochastische Modellierung der Distanzmessung von Profillaserscannern**

   Laserscanner basieren auf einem polaren Messprinzip mit Winkel- und Distanzmessung. Während die Winkelmessung nur instrumentenabhängig ist, wirken auf die Distanzmessung zusätzlich die Einflussfaktoren Atmosphäre, Messkonfiguration und Objekteigenschaften ein, wodurch die Genauigkeit der Distanzmessung stark variieren kann. Arbeiten im Bereich des terrestrischen Laserscannings (TLS) zeigen, dass sich die Präzision der Distanzmessung über die Intensität des zurückreflektierten Laserstrahls beschreiben lässt [Wujanz et al., 2017, 2018]. Die bisherigen Ansätze zur Ableitung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen für die Distanzmessung von Laserscannern setzen jedoch voraus, dass der Laserscanner einen 1D- oder 3D-Messmodus besitzt. Ein Ziel dieser Dissertation besteht folglich darin, die Methodik auf den 2D-Messmodus eines Profillaserscanners zu übertragen und damit auch

im Kontext des kinematischen Laserscannings nutzbar zu machen. Ein weiteres Ziel besteht darin, das Verhalten der Distanzmessung im Nahbereich (< 20 m) genauer zu analysieren und zu prüfen, ob die intensitätsbasierte stochastische Modellierung auch im Nahbereich uneingeschränkt anwendbar ist. Aufgrund von Defokussierungs- und Abschattungseffekten der Laseroptik kann sich die Genauigkeit im Nahbereich stark verschlechtern. Die Relevanz dieser Untersuchung liegt darin, dass man beim kinematischen Laserscanning häufig mit kurzen Zielweiten konfrontiert ist (z. B. Straßenoberfläche oder Lichtraumprofile). Auch für diese Fälle muss die Qualität beurteilt und sichergestellt werden.

2. **Konfigurationsanalyse für die ebenenbasierte Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit und Aufbau eines dauerhaft installierten Kalibrierfeldes**

   Die Darstellungen zum Stand der Forschung in Kapitel 2 belegen, dass es viele verschiedene Ansätze zur Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel von Laserscannern auf Multisensorsystemen gibt. Dabei sind ebenenbasierte Ansätze von besonderer Bedeutung. Bei diesen Ansätzen werden Ebenen im Objektraum mit dem Multisensorsystem erfasst und im Anschluss die Kalibrierparameter durch Minimierung der Abstände zwischen den Scanpunkten und den Ebenen geschätzt [Strübing & Neumann, 2013]. Ein entscheidender Vorteil der ebenenbasierten Ansätze besteht darin, dass sie auf einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten basieren. Dies erlaubt es, die Schätzung der Kalibrierparameter mit Qualitätskriterien für Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Sensitivität zu analysieren. Ein Ziel dieser Dissertation besteht daher darin, eine Konfigurationsanalyse für die Anordnung der Ebenen durchzuführen, um so eine genaue, zuverlässige und sensitive Schätzung der Kalibrierparameter mit möglichst geringen Korrelationen zu gewährleisten. Im Zuge dessen soll auch die simultane Schätzung der Nullpunktabweichung als innerem Kalibrierparameter des Laserscanners analysiert werden. Insbesondere der Aspekt der Zuverlässigkeit wurde im Kontext der Kalibrierung kinematischer Multisensorsysteme bisher nur eingeschränkt behandelt. Auf Basis der Konfigurationsanalyse soll ein dauerhaft installiertes Kalibrierfeld aufgebaut werden, das zudem eine schnelle Kalibrierprozedur implementiert. Neben einer Konfigurationsanalyse erhöht auch eine schnell wiederholbare Kalibrierprozedur die Zuverlässigkeit der Kalibrierung und erlaubt darüber hinaus belastbare Aussagen zu ihrer Genauigkeit und Stabilität. Auf diese Weise kann die Qualität der Systemkalibrierung durchgreifend beurteilt und gesichert werden.

3. **Erprobung punktbasierter, flächenbasierter und parameterbasierter Evaluierungsstrategien für kinematische Laserscanningsysteme und Aufbau einer dauerhaft installierten Evaluierungseinrichtung**

   Die Darstellungen zum Stand der Forschung in Kapitel 2 belegen, dass die empirische Bestimmung der Genauigkeit des Gesamtsystems die verbreitetste Evaluierungsmethode für kinematische Multisensorsysteme ist. Grundsätzlich lassen sich punktbasierte, flächenbasierte und parameterbasierte Ansätze unterscheiden. Bei den punktbasierten Ansätzen werden einzelne Kontrollpunkte aus den Punktwolken extrahiert und mit Referenzwerten verglichen. Bei den flächenhaften Ansätzen erfolgt dies entsprechend für die gesamte Punktwolke auf Basis von Punktwolkenvergleichen. Bei den parameterbasierten Ansätzen werden aus den Punktwolken meist geometrische Größen extrahiert und mit Referenzwerten verglichen. Wie bereits Hauser et al. [2016] betonen, gibt es zwar viele Evaluierungsmethoden, allerdings sind diese nicht standardisiert. Zudem sind Einrichtungen zur Evaluierung nur eingeschränkt vorhanden (siehe z. B. Barber et al. [2008]; Kaartinen et al. [2012]; Hofmann [2017] oder Stenz et al. [2017]). Ein Ziel dieser Dissertation besteht daher darin, eine solche Evaluierungseinrichtung aufzubauen. Genau wie das ebenenbasierte Kalibrierfeld soll die Einrichtung dauerhaft installiert und allgemein zugänglich sein. Die Einrichtung soll Kontrollpunkte und TLS-Referenzpunktwolken für eine punkt- bzw. flächenbasierte Evaluierung enthalten. Es soll eine Unterscheidung in Lage- und Höhengenauigkeit erfolgen. Außerdem sollen die TLS-Referenzpunktwolken zur Evaluierung einzelner Systemkomponenten eingesetzt werden (z. B. Systemkalibrierung). Bei aus Punktwolken abzuleitenden Parametern besteht eine große Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung. Daher wird die parameterbasierte Evaluierung anwendungsbezogen im Rahmen einer Straßenzustandserfassung erprobt. Im Ausblick dieser Dissertation werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Evaluierungseinrichtung um parameterbasierte Ansätze sowie die Evaluierung der Trajektorienschätzung erweitert werden kann.

Dieser kumulativen Dissertation liegen fünf wissenschaftlich begutachtete Publikationen zugrunde, die die oben formulierten Zielsetzungen wiederholt aufgreifen und behandeln (siehe Vorwort). Die Dissertation hat folgenden Aufbau: In Kapitel 2 wird die Dissertation in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet. Kapitel 3 beschreibt methodische Grundlagen, die zum Verständnis der Inhalte der Dissertation notwendig sind. Die fünf relevanten Publikationen werden in Kapitel 4 inhaltlich zusammengefasst. Anschließend werden in Kapitel 5 die Hauptaspekte der fünf Publikationen herausgearbeitet und die Bezüge zwischen den Publikationen hergestellt. Kapitel 6 beschreibt in Form eines Ausblicks weiterführende Überlegungen, die über den Inhalt dieser Dissertation hinausgehen. Die Dissertation schließt mit einem Fazit in Kapitel 7. Kapitel 8 listet weitere Publikationen des Autors dieser Dissertation.

2. Wissenschaftlicher Kontext

In diesem Kapitel wird die vorliegende Dissertation in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet. Zu diesem Zweck wird zunächst der Stand der Forschung in Bezug auf die Qualitätsanalyse von Laserscannern als einzelnem Sensor von kinematischen Multisensorsystemen dargelegt (Abschnitt 2.1). Anschließend wird auf die Kalibrierung (Abschnitt 2.2) und Evaluierung (Abschnitt 2.3) von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning eingegangen. Basierend auf dem Stand der Forschung werden Handlungsfelder und Problemstellungen identifiziert, die im Rahmen der vorliegenden Dissertation adressiert werden.

2.1 Qualitätsanalyse von Laserscannern

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning. Im Rahmen der Arbeit wird jedoch auch die Analyse der Genauigkeit des Laserscanners als Einzelkomponente thematisiert. Diesbezüglich wird in diesem Abschnitt der Stand der Forschung dargestellt. In Abschnitt 2.3 erfolgt dann eine Erweiterung der Betrachtungen auf die Analyse der Genauigkeit des Gesamtsystems.

Die genauigkeitsbeeinflussenden Faktoren beim Laserscanning können, wie z. B. Soudarissanane et al. [2011] oder Kuhlmann & Holst [2017] darstellen, in vier unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Dazu zählen instrumentelle Abweichungen (Strahlablenkung, Distanzmessung und zeitliche Synchronisierung), atmosphärische Abweichungen (insbesondere Temperatur und Luftdruck), Abweichungen aufgrund der Messkonfiguration (Distanz und Einfallswinkel) sowie Abweichungen aufgrund der Eigenschaften der angemessenen Oberflächen (z. B. Material, Form, Farbe oder Rauigkeit). Während die Winkelmessung lediglich durch instrumentelle Abweichungen beeinflusst wird, wird die Distanzmessung von allen vier Kategorien beeinträchtigt. Beim terrestrischen Laserscanning mit sehr langen Zielweiten können atmosphärische Einflüsse einen signifikanten Einfluss auf die Distanzmessung haben [Friedli et al., 2019]. Beim Airborne Laserscanning wie auch bei terrestrischen Messungen mit Zielweiten von bis zu 100 m – wie es bei kinematischen Laserscanningsystemen in der Regel der Fall ist – können atmosphärische Einflüsse jedoch ausreichend gut korrigiert bzw. vernachlässigt werden [Vosselman & Maas, 2010; Holst et al., 2016]. Vor diesem Hintergrund ist die Genauigkeit der Distanzmessung beim kinematischen Laserscanning im Wesentlichen von den übrigen drei Faktoren abhängig, d. h. Instrument, Messkonfiguration und Objekteigenschaften. In dieser Dissertation wird der Fokus auf die Distanzmessgenauigkeit gelegt.

Die Richtigkeit einer lasergestützten Distanzmessung wird von systematischen Abweichungen bestimmt, die kalibriert werden können, falls sie vom Instrument verursacht werden (siehe z. B. Lichti & Licht [2006]; Lichti [2007]; Vosselman & Maas [2010]; Chow et al. [2013]; Holst & Kuhlmann [2014]; Muralikrishnan et al. [2015]; Holst et al. [2016] oder Medić et al. [2019, 2020]). Allerdings können nicht kalibrierte Instrumentenabweichungen wie auch die Messkonfiguration oder das Messobjekt systematische Abweichungen hervorrufen, die die Genauigkeit beeinträchtigen. Daher haben sich viele Publikationen mit der Analyse der Genauigkeit von Laserscannern auseinandergesetzt, z. B. indem man ihre Messungen mit Referenzwerten vergleicht, die interferometrisch [Böhler et al., 2003; Gräfe, 2007a; Zámečníková et al., 2014; Mettenleiter et al., 2015], tachymetrisch [Lindstaedt et al., 2012] oder mithilfe eines Theodolitmesssystems [Zámečníková et al., 2015] bestimmt wurden. Alternativ ist es auch möglich, zielzeichenbasierte Testfelder mit bzw. ohne Referenzinformationen [Böhler et al., 2003; Wunderlich et al., 2013; Neitzel et al., 2014; Rivera-Castillo et al., 2017; Stenz et al., 2017] oder spezielle Testobjekte zu nutzen [Lindstaedt et al., 2012; Wunderlich et al., 2013; Stenz et al., 2017]. Einen Überblick hierzu liefern Holst et al. [2016].

Die Präzision einer lasergestützten Distanzmessung wird von zufälligen Abweichungen bestimmt, die durch Mehrfachmessungen reduziert werden können. In den meisten Fällen wird die Präzision analysiert, indem geometrische Primitive, wie z. B. Ebenen [Böhler et al., 2003; Voegtle et al., 2008; Soudarissanane et al., 2011; Wunderlich et al., 2013; Bolkas & Martinez, 2018] oder Kugeln [Lindstaedt et al., 2012; Wunderlich et al.,

2013], abgescannt und approximiert werden. Die Verbesserungen der Approximation werden herangezogen, um das Rauschen der Distanzmessung zu quantifizieren. Laut Wujanz et al. [2017] hat diese Vorgehensweise allerdings einige Nachteile. Das so bestimmte Messrauschen ist eine Mischung aus winkel- und streckenbedingten Abweichungen. Ferner gibt es eine Abhängigkeit der Approximationsergebnisse von der Messkonfiguration, den Objekteigenschaften, der Auflösung, der Redundanz und der verwendeten Software. Ein weiterer großer Nachteil ist, dass der Ansatz von der Qualität der geometrischen Primitive abhängt, die signifikant besser sein muss als das Rauschen des Laserscanners. Um diese Probleme zu umgehen, betreiben Wujanz et al. [2017] den Laserscanner im 1D-Messmodus. Durch Wiederholungsmessungen eines identischen Punktes auf einer ebenen Oberfläche kann so das Distanzmessrauschen bestimmt werden. Diese Vorgehensweise wird auch in Kurz et al. [2013] und Mettenleiter et al. [2015] angewendet.

Untersuchungen zur Richtigkeit und Präzision von Laserscannern werden normalerweise für verschiedene Messdistanzen durchgeführt. Zusätzlich wird der Einfluss von unterschiedlichen Einfallswinkeln des Laserstrahls auf die Objektoberfläche analysiert (siehe z. B. Gräfe [2007a]; Voegtle et al. [2008]; Soudarissanane et al. [2011]; Lindstaedt et al. [2012]; Wunderlich et al. [2013]; Zámečníková et al. [2015]; Soudarissanane [2016]; Bolkas & Martinez [2018] oder Chaudhry et al. [2019]). Die Messdistanz und der Einfallswinkel kennzeichnen hierbei den Einfluss der Messkonfiguration. Darüber hinaus beschäftigen sich viele Arbeiten mit dem Einfluss der Objekteigenschaften, wie z. B. Farbe, Material oder Rauigkeit (siehe z. B. Böhler et al. [2003]; Kersten et al. [2005]; Gräfe [2007a]; Voegtle et al. [2008]; Wunderlich et al. [2013]; Zámečníková et al. [2014]; Zámečníková & Neuner [2017] oder Bolkas & Martinez [2018]). Problematisch an diesen Vorgehensweise ist, dass keine allgemein gültigen Aussagen zur Genauigkeit getroffen werden können, da die Resultate immer nur für die spezifische Kombination aus Messkonfiguration und Objekteigenschaften gültig sind.

In diesem Zusammenhang weisen jedoch viele der genannten Studien auf einen Zusammenhang zwischen der Intensität des zurückgestreuten Laserlichts und der Präzision der Distanzmessung hin. Dies wird auch seitens der Theorie durch die so genannte Laser-Radar-Gleichung bestätigt, die die Intensität des zurückgestreuten Laserlichts mit den Eigenschaften des Instruments, den atmosphärischen Einflüssen, der Messkonfiguration sowie den Objekteigenschaften in Beziehung setzt (siehe z. B. Jelalian [1992]; Höfle & Pfeifer [2007] oder Pfeifer et al. [2017]). Der Zusammenhang zwischen Intensität und Präzision wurde von Wujanz et al. [2017] näher untersucht, was zur Ableitung eines intensitätsbasierten stochastischen Modells für die Distanzmessung eines 3D Laserscanners führte. Dazu wurde der Laserscanner im 1D-Messmodus betrieben und für verschiedene Messdistanzen, Einfallswinkel und Objekteigenschaften Mehrfachmessungen eines identischen Punktes durchgeführt. Basierend darauf wurde ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Distanzmessrauschen und der zurückgestreuten Intensität nachgewiesen. Daraus folgt, dass man den Einfluss von Messkonfiguration und Objekteigenschaften auf die Präzision der Distanzmessung über die Intensität des zurückgestreuten Laserlichts kodieren kann. Ein großer Nachteil der Vorgehensweise in Wujanz et al. [2017] ist jedoch, dass der Laserscanner im 1D-Messmodus betrieben wird. Der 1D-Messmodus ist für Nutzer aufgrund der gebündelten Laserenergie aus Sicherheitsgründen normalerweise nicht zugänglich. Als Lösung wurden in Lambertus et al. [2018]; Wujanz et al. [2018] und Schmitz et al. [2019] modifizierte Ansätze publiziert, in denen ebene Zieltafeln im normalen 3D-Messmodus des Laserscanners abgescannt werden, um das Rauschen aus den Residuen einer Approximation zu erhalten. Dieses Rauschen wird der mittleren Intensität der Zieltafel zugeordnet. In Kermarrec et al. [2019] findet zudem eine Erweiterung der Modelle auf Korrelationen statt. Allerdings setzen die Ansätze für den 3D-Messmodus wiederum Modellwissen voraus. Ferner sollten die Zieltafeln einheitliche Rückstreueigenschaften haben.

Das Studium der Fachliteratur zeigt, dass die Beschreibung der Präzision der Distanzmessung auf Grundlage der Intensität des zurückgestreuten Laserlichts eine vielversprechende Vorgehensweise ist. Allerdings haben sich bisherige Studien auf Laserscanner für TLS beschränkt, die im 1D- oder 3D-Messmodus betrieben werden [Wujanz et al., 2017, 2018; Lambertus et al., 2018; Schmitz et al., 2019]. Im Kontext von Multisensorsystemen kommen aber verbreitet Profillaserscanner zum Einsatz, die nur einen 2D-Messmodus besitzen. Ein Ziel dieser Dissertation besteht daher darin, eine Methodik zu entwickeln, mit der intensitätsbasierte stochastische Modelle auch für einen Profillaserscanner abgeleitet werden können. Aus praktischen Gründen sollte der Laserscanner im normalen 2D-Messmodus betrieben werden, es sollten keine Modellannahmen für die abgescannten Oberflächen erfolgen und es sollte keine zusätzliche Messausrüstung benötigt werden. Darüber hinaus soll der neu entwickelte Ansatz auch dazu eingesetzt werden, den Nahbereich detaillierter zu analysieren, da dieser für viele Anwendungen im Bereich des kinematischen Laserscannings relevant ist.

2.2 Kalibrierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning

Bei der Kalibrierung von kinematischen Multisensorsystemen wird allgemein zwischen innerer und äußerer Kalibrierung unterschieden. Die innere Kalibrierung beschäftigt sich mit der Kalibrierung von systematischen Abweichungen der einzelnen Sensoren. Dazu gehören Variationen und Offsets des elektrischen Phasenzentrums bei GNSS-Antennen (siehe z. B. Zeimetz [2010]; Teunissen & Montenbruck [2017]), Achsabweichungen, Offsets und Skalenfaktoren von Inertialsensoren und Odometern (siehe z. B. Titterton & Weston [2004]; Groves [2013]), sowie sensorinterne Kalibierparameter von Laserscannern (siehe z. B. Vosselman & Maas [2010]; Holst et al. [2016]) und Kameras (siehe z. B. Förstner & Wrobel [2016]; Luhmann [2018]).

Im Gegensatz hierzu behandelt die äußere Kalibrierung die Bestimmung der gegenseitigen Einbaulage der Sensoren auf der Trägerplattform, die durch die Hebelarme und Boresight-Winkel zwischen den Bezugspunkten bzw. Bezugssystemen der einzelnen Sensoren beschrieben wird. Der Fokus dieser Dissertation liegt auf der äußeren Kalibrierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning. Die Zielgrößen dieser Kalibrierung sind der Hebelarm und die Boresight-Winkel zwischen dem Bezugssystem des Laserscanners und dem plattformfesten Bezugssystem, auf das sich die geschätzten Positions- und Orientierungsparameter der georeferenzierenden Sensoren beziehen. Das plattformfeste Bezugssystem wird in den meisten Fällen durch das Bezugssystem der IMU bzw. der GNSS/IMU-Einheit realisiert (siehe Kapitel 3.1 für die Definition der Bezugssysteme). Ergänzend zur äußeren Kalibrierung von Laserscannern wird in dieser Dissertation auch die Bestimmung der Nullpunktabweichung des Laserscanners angerissen. Streng genommen zählt die Nullpunktabweichung zur inneren Kalibrierung. Es besteht jedoch die Möglichkeit, die Nullpunktabweichung als zusätzlichen Kalibrierparameter im Zuge der äußeren Kalibrierung mitzubestimmen.

Um den Stand der Forschung auf dem Gebiet der äußeren Kalibrierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning besser einordnen und bewerten zu können, ist vorab zu definieren, welche Eigenschaften die Kalibrierung idealerweise haben sollte. Eine Kalibrierprozedur sollte sensitiv für alle relevanten Kalibrierparameter (hier: Hebelarm und Boresight-Winkel) sein, eine genaue und zuverlässige Bestimmung dieser Parameter mit möglichst geringen Korrelationen erlauben und darüber hinaus schnell, einfach, wiederholbar und möglichst universell auf verschiedenartige Multisensorsysteme anwendbar sein. Vor diesem Hintergrund teilt die vorliegende Dissertation die Ansätze zur äußeren Kalibrierung von Laserscannern auf kinematischen Multisensorsystemen in drei Kategorien ein. Diese drei Kategorien werden im Folgenden mit den Begriffen *sensorbasiert*, *entropiebasiert* und *geometriebasiert* bezeichnet und methodisch vorgestellt.

Sensorbasierte Kalibrieransätze

Bei den sensorbasierten Ansätzen werden Hebelarme und Boresight-Winkel von Laserscannern bestimmt, indem klar definierte Referenzpunkte auf der Trägerplattform bzw. den Sensoren durch Einsatz von externen Messinstrumenten direkt oder indirekt angemessen und zueinander koordiniert werden. Dabei kommen beispielsweise Tachymeter oder Lasertracker [Gräfe, 2007b; Keller & Sternberg, 2013; Hartmann et al., 2017a; Brüggemann et al., 2018], Theodolitmesssysteme [Hesse, 2007], Messarme [Eling et al., 2014b], Nahbereichsphotogrammetrie [Vennegeerts, 2011; Keller & Sternberg, 2013] oder auch Streifenprojektionssysteme [Keller & Sternberg, 2013] zum Einsatz. Im Bereich des Airborne Laserscannings werden sensorbasierte Kalibrieransätze standardmäßig eingesetzt, um den Hebelarm zwischen dem Laserscanner und der GNSS/IMU-Einheit zu bestimmen [Vosselman & Maas, 2010]. Verfügt der Laserscanner über einen 3D-Messmodus, können auch Referenzpunkte, deren Positionen im plattformfesten Bezugssystem bekannt sind, statisch abgescannt und die Sensoren so indirekt zueinander koordiniert werden [Talaya et al., 2004; Hesse, 2007; Vennegeerts, 2011; Keller & Sternberg, 2013].

Der Nachteil der sensorbasierten Ansätze besteht darin, dass die Verfahren häufig aufwändig sind, spezielle Messausrüstung erfordern, auf gewisse Messsysteme zugeschnitten sind, eine mechanische Realisierung der Sensor- bzw. Plattformbezugssysteme in Form von klar definierten Referenzpunkten benötigen oder einen 3D-Messmodus des Laserscanners voraussetzen. Damit erfüllen die sensorbasierten Ansätze die Forderung

einer einfachen, schnellen und universell einsetzbaren Kalibriermethode nicht. Darüber hinaus ist die genaue und zuverlässige Bestimmung der Boresight-Winkel häufig schwierig, weil die Dimensionen der Systeme in der Regel auf einige Dezimeter bis wenige Meter begrenzt sind, sodass sehr hohe Genauigkeitsanforderungen an die Definition der Referenzpunkte sowie ihre Einmessung gestellt werden. Die sensorbasierten Ansätze basieren zudem auf der Annahme, dass die angemessenen Referenzpunkte auch tatsächlich die Sensor- bzw. Plattformbezugssysteme repräsentieren. Die Nichteinhaltung dieser Anforderungen kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kalibrierung beeinträchtigen.

Entropiebasierte Kalibrieransätze

Neben den sensorbasierten Ansätze haben sich entropie- und geometriebasierte Ansätze entwickelt, die den Einschränkungen der sensorbasierten Ansätze nicht unterliegen, da sie schneller und einfacher in der Durchführung und zudem universeller auf verschiedenartige Systeme anwendbar sind. Obwohl die Ausgestaltung der entropie- und geometriebasierten Ansätze sehr vielfältig ist, basieren alle auf der Grundidee, dass man die vom kinematischen Multisensorsystem erfassten Punktwolken auf Inkonsistenzen bezüglich der Position, Orientierung oder Form von Objektraumstrukturen prüft. Die Annahme besteht darin, dass sich Inkonsistenzen in den Punktwolken auf eine unzureichende Kalibrierung des Multisensorsystems zurückführen lassen. Durch Anpassung der Kalibrierparameter werden die Inkonsistenzen in der Punktwolke minimiert.

Bei den entropiebasierten Kalibrieransätzen wird eine beliebige Umgebung unter Variation von Position und Orientierung des kinematischen Multisensorsystems abgescannt. Die resultierende Punktwolke wird als Realisierung einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion repräsentiert, die die Wahrscheinlichkeit angibt, an einer bestimmten Stelle einen Punkt zu beobachten. Auf Basis der (quadratischen Rényi-) Entropie dieser Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wird eine Kostenfunktion aufgestellt, die die Konsistenz innerhalb der Punktwolke beschreibt und durch Anpassung der Kalibrierparameter iterativ optimiert wird. Eine Punktwolke mit geordneten Objektraumstrukturen hat in diesem Zusammenhang eine höhere Konsistenz als eine Punktwolke mit ungeordneten Objektraumstrukturen [Sheehan et al., 2010, 2012]. Diese Art der Selbstkalibrierung wurde auf viele unterschiedliche Indoor-Systeme [Elseberg et al., 2013; Keller, 2015; Nüchter et al., 2015a,b; Hillemann et al., 2019b] und Outdoor-Systeme [Maddern et al., 2012; Elseberg et al., 2013; Keller, 2015; Maddern et al., 2017; Hillemann et al., 2019a,b] angewendet. Neben entropiebasierten Kostenfunktionen können auch andere Kostenfunktionen verwendet werden, die auf geometrischen Eigenschaften von Punktnachbarschaften wie Planarität, Krümmung oder Omnivarianz basieren [Levinson & Thrun, 2014; Hillemann et al., 2019b]. In Levinson & Thrun [2014] werden darüber hinaus innere Kalibrierparameter des Laserscanners mitgeschätzt. Die Kostenfunktionen auf Basis von geometrischen Eigenschaften stellen eine Verbindung zu den geometriebasierten Ansätzen dar, die weiter unten behandelt werden.

Problematisch an den Selbstkalibrierungsansätzen auf Basis von entropie- oder geometriebasierten Kostenfunktionen ist jedoch, dass die Qualität der Kalibrierung maßgeblich von der Struktur der Umgebung und der Form der Trajektorie abhängt [Hillemann et al., 2019a]. Idealerweise wird die gleiche Umgebung unter Variation aller sechs Freiheitsgrade (Position und Orientierung) mehrfach abgescannt. Diesbezüglich sind zum Beispiel Höhen- und Neigungsvariationen für fahrzeuggebundene Systeme schwierig zu realisieren, sodass die Sensitivität gegenüber gewissen Kalibrierparametern abnimmt. Ferner liefern die Ansätze keine unmittelbaren Aussagen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kalibrierparameter, sodass eine Qualitätsbewertung schwierig ist. Die Genauigkeit der Kalibrierparameter wird in der Regel auf Basis von Wiederholungskalibrierungen und der Konsistenz der Punktwolke bewertet. Die Zuverlässigkeit wird nicht bewertet.

Geometriebasierte Kalibrieransätze

Bei den geometriebasierten Ansätzen werden wohldefinierte geometrische Formen im Objektraum verwendet, um die Hebelarme und Boresight-Winkel von Laserscannern zu bestimmen. Eine Möglichkeit der Selbstkalibrierung besteht darin, spezielle Fahrmanöver entlang geeigneter Objektraumstrukturen durchzuführen. Beispielsweise werden in Keller & Sternberg [2013]; Sternberg et al. [2013] und Keller [2015] ebene Gebäudefassaden oder zylindrische Objekte in entgegengesetzter Richtung oder mit variierender Geschwindigkeit

abgescannt, um Abweichungen in der Boresight-Kalibrierung und der Zeitsynchronisierung zu bestimmen. Dabei werden potentielle Verkippungen und Verschiebungen der Objekte in den Punktwolken detektiert und auf eine unzureichende Kalibrierung zurückgeführt. Vergleichbare Ansätze werden auch zur Bestimmung der Boresight-Winkel von Fächerecholoten bei schiffsgebundenen Systemen mittels Patch-Verfahren (siehe z. B. Seube et al. [2016]; Brüggemann et al. [2018]) oder beim Strip-Adjustment im Airborne und UAV-basierten Laserscanning angewendet (siehe z. B. Vosselman & Maas [2010]; Habib et al. [2010]; Li et al. [2019]). In Habib et al. [2010] werden zusätzlich auch der Hebelarm sowie innere Kalibrierparameter für den Laserscanner mitgeschätzt. Es zeigt sich jedoch, dass die Selbstkalibrierung ohne Referenzinformationen für die Höhe der Ebenen nicht ausreichend sensitiv für die vertikale Komponente des Hebelarms ist.

Problematisch an den genannten Verfahren ist, dass es sich häufig um eine Einzelkomponentenkalibrierung handelt, bei der die Kalibrierparameter getrennt und nach der Reihe betrachtet werden. Da Abweichungen in einer Punktwolke aber immer aus einer Überlagerung mehrerer Einflussgrößen resultieren, ist bei Multisensorsystemen prinzipiell eine Systemkalibrierung zu bevorzugen. Die Ansätze von Habib et al. [2010] und Li et al. [2019] verfolgen den Gedanken einer Systemkalibrierung, allerdings werden aufgrund eingeschränkter Sensitivität immer nur Teile der Kalibrierparameter bestimmt und eine Trennung der Kalibrierparameter aufgrund von Korrelationen ist oftmals schwierig. Die Qualität der Kalibrierung wird bei den beschriebenen Selbstkalibrierungsansätzen in der Regel nur auf Basis der Konsistenz der Punktwolke bewertet, sodass eine Qualitätsanalyse hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kalibrierung schwierig ist.

Eine bessere Möglichkeit besteht darin, strenge Bedingungsgleichungen zwischen den Scanpunkten des Multisensorsystems und den geometrischen Formen zu nutzen. Obwohl grundsätzlich unterschiedliche geometrische Formen, wie z. B. Ebenen, Zylinder oder Kugeln (siehe z. B. Strübing & Neumann [2013]; Strübing [2016] oder Chen et al. [2018]), denkbar sind, verdeutlicht das Studium der Fachliteratur, dass ebenenbasierte Ansätze am verbreitetsten sind. Neben der einfachen Parametrisierung von Ebenen über ihre Normale und den orthogonalen Abstand zum Koordinatenursprung, liegt dies auch daran, dass Ebenen in den Messumgebungen kinematischer Multisensorsysteme die am häufigsten vorkommende geometrische Form sind.

Ebenenbasierte Kalibrieransätze werden bereits seit Langem im Bereich des Airborne Laserscannings eingesetzt, wobei der Fokus auf der Bestimmung der Boresight-Winkel und der Nullpunktabweichung des Laserscanners liegt. Der Hebelarm zwischen Laserscanner und GNSS/IMU-Einheit wird – wie bereits zu Beginn dieses Abschnittes beschrieben – in der Regel mithilfe von sensorbasierten Verfahren separat im Labor bestimmt [Vosselman & Maas, 2010]. In Filin [2001, 2003] werden Bedingungsgleichungen zwischen den Scanpunkten eines Airborne Laserscanningsystems und natürlichen, ebenen Geländeoberflächen auf der Erdoberfläche, die zuvor über GPS-Messungen terrestrisch eingemessen wurden, verwendet, um die Boresight-Winkel und die Nullpunktabweichung des Laserscanners während des Fluges in einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten zu schätzen. In Skaloud & Lichti [2006] und Skaloud & Schaer [2007] wird diese Idee zu einem Selbstkalibrierungsansatz weiterentwickelt, indem die Ebenenparameter nicht vorab eingemessen, sondern in der Ausgleichung mitgeschätzt werden. Sehr ähnliche Ansätze finden sich auch in Schiele [2005]; Friess [2006] und Lindenthal et al. [2011]. Durch den vermehrten Einsatz von Laserscannern auf kleinen Fluggeräten werden ebenenbasierte Selbstkalibrieransätze inzwischen auch für UAV-getragene Systeme eingesetzt [Ravi et al., 2018; Keyetieu & Seube, 2019; Martins de Oliveira Junior & Rodrigues dos Santos, 2019]. Als Kalibrierobjekte werden sowohl vorhandene Ebenen, wie flache Geländeoberflächen oder Gebäudedächer, aber auch künstlich ausgelegte Ebenen verwendet. In Ravi et al. [2018] wird neben den Boresight-Winkeln auch der Hebelarm mitkalibriert. Allerdings zeigt sich auch hier, dass die ebenenbasierte Selbstkalibrierung für die vertikale Hebelarmkomponente nicht ausreichend sensitiv ist.

Die Idee der ebenenbasierten Selbstkalibrierung aus dem Bereich des Airborne Laserscannings wurde auch auf bodengebundene Systeme übertragen. Dabei kommen ebenfalls häufig vorhandene Ebenen zum Einsatz, wie z. B. Gebäudefassaden, Bodenflächen oder Straßenschilder, die durch mehrfaches Befahren einer Szene unter Variation des Blickwinkels aufgenommen werden [Rieger et al., 2010; Glennie, 2012; Hauser et al., 2016; Tsai et al., 2018]. In Chan et al. [2013] werden neben Ebenen auch gekrümmte Stromoberleitungen verwendet, die über eine entsprechende Parametrisierung in die Ausgleichung eingeführt werden. Während in Rieger et al. [2010] und Chan et al. [2013] nur die Boresight-Winkel bestimmt werden, erweitern Glennie [2012]; Hauser et al. [2016] und Tsai et al. [2018] ihre Ansätze auch auf den Hebelarm. Ferner schätzt Glennie [2012] innere Kalibrierparameter für den Laserscanner mit. Allerdings misslingt es wie bei den luftgestützten

Systemen auch in diesen Fällen, die vertikale Hebelarmkomponente zu bestimmen. Löst man sich von der Idee der Selbstkalibrierung und bindet Referenzinformationen für die Ebenenanordnung ein, kann diese Problematik überwunden werden, sodass die Boresight-Winkel und alle Hebelarmkomponenten simultan bestimmt werden können. In Hong et al. [2017] werden die Ebenen zum Beispiel vorab mithilfe von TLS eingemessen. Zur Kalibrierung der Hebelarme und der Boresight-Winkel eines Laserscanners und eines Fächerecholots auf einem schiffsgebundenen System werden in Lu et al. [2019] Referenzebenen mithilfe eines Tachymeters eingemessen. Ähnliche Vorgehensweisen werden auch in Strübing & Neumann [2013]; Keller [2015]; Strübing [2016] sowie Hartmann et al. [2015, 2017b, 2019] für kinematische Laserscanningsysteme im Indoor-Bereich bzw. auf Schienenfahrzeugen genutzt, wobei künstliche Ebenen mithilfe eines Lasertrackers eingemessen und im Anschluss mit dem Multisensorsystem abgescannt werden. Durch die vorherige Einmessung gelingt es, alle sechs Kalibrierparameter simultan zu bestimmen. Erwähnenswerte Abwandlungen der ebenenbasierten Kalibrierung finden sich beispielsweise in Le Scouarnec et al. [2013] und Yin et al. [2018], die Koplanaritäts- und Orthogonalitätsbeziehungen zwischen Scanlinien und Ebenennormalen ausgleichen; sowie in Jian & Ravani [2016], die Linienschnitte und bekannte Abstandsbeziehungen auf einem ebenen Schachbrett für die Kalibrierung nutzen. Allerdings erfolgt in Le Scouarnec et al. [2013] und Jian & Ravani [2016] jeweils nur eine Bestimmung der drei Boresight-Winkel.

Obwohl alle ebenenbasierten Ansätze auf der gleichen Grundidee basieren, variieren sie bezüglich ihrer Umsetzung. Die wichtigsten Unterschiede liegen dabei in der Anzahl der geschätzten Kalibrierparameter, der Nutzung von natürlichen oder künstlichen Ebenen und dem generellen Umgang mit den Ebenenparametern. Der letzte Punkt bezieht sich darauf, dass die Ebenenparameter entweder vorab mithilfe einer terrestrischen Einmessung bestimmt oder in der Kalibrierung als Unbekannte mitgeschätzt werden. Letzteres führt auf einen Selbstkalibrierungsansatz, der hinsichtlich der Durchführung einfacher und schneller ist, jedoch Defizite in Bezug auf die Sensitivität gegenüber der vertikalen Hebelarmkomponente hat.

In den meisten Arbeiten zur ebenenbasierten Kalibrierung wird auf die Bedeutung der Konfiguration bei der Ebenenanordnung hingewiesen, d. h. Anzahl, Größe, Position und Orientierung der Ebenen. Ein Vorteil der ebenenbasierten Verfahren gegenüber anderen Kalibrierverfahren liegt darin, dass die Kalibrierung auf einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten basiert, für die – ähnlich wie bei geodätischen Netzen [Niemeier, 2008] – unterschiedliche Maße zur Bewertung der Konfiguration bzw. der Qualität der Parameterschätzung hinsichtlich Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Sensitivität bestimmt werden können. Als Qualitätsmaße werden vornehmlich die Sensitivität der Konfiguration für Änderungen in den Kalibrierparametern sowie für die Genauigkeit die Varianzen und Korrelationen der Kalibrierparameter herangezogen. Weitere Qualitätsmaße sind die Stabilität des Konvergenzverhaltens in der Ausgleichung und die Reduktion der Ebenenresiduen nach der Kalibrierung. Im Zuge dessen wurden auch Versuche unternommen, die Anordnung der Ebenen dahingehend zu optimieren, dass die Genauigkeit der Parameter steigt bzw. weniger Ebenen benötigt werden. Die Versuche basieren darauf, verschiedene Ebenenanordnungen einander gegenüber zu stellen und die beste Anordnung auszuwählen (siehe z. B. Skaloud & Lichti [2006]; Keller [2015]; Hong et al. [2017] oder Ravi et al. [2018]). Ansätze zur Automatisierung dieser Auswahl finden sich z. B. in Hartmann et al. [2019] und Keyetieu & Seube [2019]. Hinsichtlich der Qualitätsbewertung fällt jedoch auf, dass der Aspekt der Zuverlässigkeit im Sinne der Robustheit der Kalibrierung gegenüber groben Beobachtungsfehlern bzw. des Einflusses der Beobachtungen auf die geschätzten Parameter kaum bzw. nur sehr eingeschränkt behandelt worden ist (siehe z. B. Filin [2001, 2003] und Schiele [2005]).

Zwischenfazit

Die Ausführungen zur äußeren Kalibrierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning verdeutlichen, dass es viele verschiedene Ansätze zur Bewältigung dieser Aufgabe gibt. Dabei zeigt sich, dass geometriebasierte Ansätze auf Basis von Ebenen, die zusätzlich Referenzinformationen für die Ebenenparameter in die Kalibrierung einführen, günstige Eigenschaften aufweisen, da die Kalibriermessung (abgesehen von der vorherigen Einmessung der Ebenen) schnell und einfach durchführbar ist, auf verschiedenartige Multisensorsysteme einfach übertragbar ist und aufgrund der zugrunde liegenden Ausgleichung nach kleinsten Quadraten eine durchgreifende Qualitätsanalyse in Hinblick auf Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Sensitivität

der Kalibrierparameter möglich ist. Allerdings ist das volle Potential der Qualitätsanalyse bisher nicht ausgeschöpft worden, da der Aspekt der Zuverlässigkeit in der Vergangenheit wenig beachtet wurde. An diesem Punkt setzt die vorliegende Dissertation an, indem sie die Konfigurationsanalyse der Ebenenanordnung um Betrachtungen zur Zuverlässigkeit erweitert. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass diese Dissertation auf die Realisierung eines dauerhaft installierten Kalibrierfeldes abzielt, das aus einer vorangegangenen Konfigurationsanalyse resultiert. In bisherigen Arbeiten werden meist natürlich vorhandene Ebenen genutzt, deren gegebene Konfiguration bewertet wird bzw. es werden basierend auf vorangegangenen Überlegungen künstliche Ebenen im Objektraum gesucht oder eingebracht. Die eingebrachten Ebenen sind jedoch in der Regel nur temporär installiert. Die dauerhafte Installation ebenenbasierter Kalibrierfelder ist im Indoor-Bereich bereits durchgeführt worden (siehe z. B. Keller [2015]; Hartmann et al. [2017b, 2019]). Im Rahmen dieser Dissertation wird dies für den Outdoor-Bereich angestrebt.

2.3 Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning

Die Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning beschäftigt sich damit, die Genauigkeit des Systems festzustellen. Wie die Ausführungen in Abschnitt 1.1 zeigen, wird dies in der Regel empirisch auf Grundlage der gemessenen Punktwolke durchgeführt. Die Strategien zur empirischen Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme werden in dieser Dissertation in punktbasierte, flächenbasierte und parameterbasierte Ansätze eingeteilt. Im Folgenden werden alle drei Kategorien methodisch vorgestellt.

Punktbasierte Evaluierungsstrategien

Bei den punktbasierte Ansätzen werden entweder natürliche Kontrollpunkte (z. B. Gebäudeecken, Kanaldeckel, Straßenlaternen, Straßenmarkierungen, etc.) oder künstliche Kontrollpunkte (z. B. Zielzeichen, Punktmarkierungen, etc.) aus den Punktwolken des kinematischen Multisensorsystems extrahiert und mit Referenzwerten verglichen, die zuvor über klassische Messverfahren, z. B. GNSS, TLS, Tachymetrie oder Nivellement, eingemessen wurden (siehe z. B. Talaya et al. [2004]; Gräfe [2007b]; Hesse [2007]; Barber et al. [2008]; Vennegeerts et al. [2008]; Vennegeerts [2011]; Kaartinen et al. [2012]; Kukko et al. [2012]; Elseberg et al. [2013]; Schlichting et al. [2014]; Mao et al. [2015]; Hauser et al. [2016]; Hofmann & Brenner [2016]; Hofmann [2017] oder Mattheuwsen et al. [2019]). Auf diese Weise lässt sich die Richtigkeit des Gesamtsystems evaluieren. Neben der Richtigkeit kann auch die Präzision des Gesamtsystems bewertet werden, indem man relative Kontrollpunktabstände betrachtet oder identische Kontrollpunkte mehrfach aufnimmt.

Ein Vorteil von Kontrollpunkten besteht darin, dass man für eindeutig definierte Punkte hochgenaue Sollwerte zur Verfügung stellen kann. Zudem besteht die Möglichkeit, Lage und Höhe getrennt voneinander zu evaluieren, falls die Kontrollpunkte sowohl lage- als auch höhenmäßig bekannt sind. Nachteilig ist, dass mithilfe von Kontrollpunkten immer nur das Gesamtsystem analysiert werden kann. Rückschlüsse auf einzelne Systemkomponenten, wie beispielsweise die Trajektorienschätzung oder die Kalibrierung, sind schwierig. Ein weiterer Nachteil von Kontrollpunkten liegt darin, dass diese von kinematischen Multisensorsystemen nicht direkt angemessen werden können, sondern in der Regel aus einer lokalen Punktnachbarschaft indirekt extrahiert werden müssen, z. B. indem man bei Kanaldeckeln Mittelpunkte schätzt, bei Fahrbahnmarkierungen Linien verschneidet oder bei künstlichen Kontrollpunkten Algorithmen zur Zielzeichenerkennung einsetzt. Dies setzt eine ausreichende Punktauflösung innerhalb der Punktwolke voraus. Ferner wird der Großteil der aufgenommenen Punktwolke des Multisensorsystems bei der Nutzung von Kontrollpunkten vernachlässigt. Die genannten Nachteile werden durch die flächenbasierten Evaluierungsstrategien teilweise kompensiert.

Flächenbasierte Evaluierungsstrategien

Bei den flächenbasierten Evaluierungsstrategien gibt es verschiedene Ansätze. So können zum Beispiel georeferenzierte 3D-Stadtmodelle als Referenz für eine Evaluierung genutzt werden (siehe z. B. Haala et al.

[2008]).[2] Dabei lassen sich Abstände zwischen der Punktwolke des Multisensorsystems und den Oberflächen des Modells berechnen. In Ergänzung hierzu werden auch häufig Referenzpunktwolken – z. B. aus TLS – für Evaluierungszwecke genutzt (siehe z. B. Elseberg et al. [2013]; Toschi et al. [2015]; Hauser et al. [2016]; Hofmann & Brenner [2016]; Hofmann [2017]; Hartmann et al. [2018]; Tucci et al. [2018] oder Stenz et al. [2017, 2020]). Referenzpunktwolken werden zunehmend genutzt, da einige Softwarepakete inzwischen Algorithmen für direkte Punktwolkenvergleiche zur Verfügung stellen. Einen Überblick hierzu liefern Holst et al. [2017]. Bei Verwendung von georeferenzierten 3D-Stadtmodellen oder Referenzpunktwolken kann die Richtigkeit kinematisch erfasster Punktwolken evaluiert werden. Alternativ bietet sich auch hier die Möglichkeit, die Präzision zu analysieren. Beispielsweise werden in Barber et al. [2008] identische Areale der Straßenoberfläche, die mehrmals mit einem kinematischen Multisensorsystem aufgenommen worden sind, vermascht und miteinander verglichen.

Flächenbasierte Ansätze ergänzen die punktbasierten Verfahren insofern, als dass die gesamte Punktwolke des Multisensorsystems zur Evaluierung genutzt wird. Allerdings besteht hier das Problem der korrekten Zuordnung von Vergleichspunkten, weil die klare Definition eines Kontrollpunktes entfällt. Die Herausforderungen und Chancen bei der Nutzung von flächenbasierten Evaluierungsstrategien liegen in der korrekten Interpretation der Differenzen zwischen den Punktwolken. Dies hängt stark von der Struktur des Objektes und der abgefahrenen Trajektorie ab. So lassen sich beim Abscannen einer vertikalen Wand Abweichung in der Höhenkomponente des Multisensorsystems nicht detektieren. Auf der anderen Seite kann aber eine Abweichung im Rollwinkel der Trajektorie durch eine Verkippung der Wand sichtbar gemacht werden. Allerdings kann eine Verkippung der Wand auch durch eine fehlerhafte Boresight-Kalibrierung hervorgerufen werden (siehe Keller & Sternberg [2013]; Sternberg et al. [2013] und Keller [2015]). Man erkennt anhand dieses Beispiels, dass mithilfe flächenbasierter Verfahren eine zielgerichtete Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme möglich ist. Dazu bedarf es aber einer wohlüberlegten Anwendung der Verfahren.

Parameterbasierte Evaluierungsstrategien

Das Endprodukt der Objektraumerfassung mittels kinematischer Multisensorsysteme ist meistens nicht die Punktwolke, sondern aus der Punktwolke abgeleitete Informationen, wie z. B. Objekte des Straßenraums, Gebäudemodelle, Lichtraumprofile oder Straßenzustandsparameter. In diesem Zusammenhang besteht die Möglichkeit, Objekte bzw. beschreibende Parameter aus Wiederholungsmessungen mehrfach aus den Punktwolken zu extrahieren und miteinander zu vergleichen. Diese Strategie erlaubt Aussagen zur Präzision des kinematischen Multisensorsystems. Liegen darüber hinaus Sollwerte für die Zielgrößen vor, kann zusätzliche die Richtigkeit der Objekterfassung analysiert werden. So werden in Hauser et al. [2016] wiederholt lineare und zylindrische Objekte in Form von Bordsteinkanten und Pfosten aus den Punktwolken extrahiert und ein Vergleich zu Referenzwerten angestellt, die aus TLS-Messungen bzw. manuellen Maßbandmessungen stammen. In Lienhart et al. [2017] und Kalenjuk et al. [2019] wird die Neigung von Hangstützmauern in alpinen Regionen unter Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Distanz zum Objekt wiederholt aus den Punktwolken bestimmt und miteinander verglichen. Entsprechende Untersuchungen im Zusammenhang mit Straßenneigungen finden sich z. B. in Holgado-Barco et al. [2014] und Wang et al. [2017]. Genauigkeitsanalysen basierend auf der Bestimmung der geometrischen Parameter von Trassierungselementen – d. h. Geraden, Kreisbögen und Klothoiden – aus kinematisch erfassten Punktwolken erfolgen z. B. in Holgado-Barco et al. [2015] oder Martín-Jiménez et al. [2018]. Auch bei Anwendungen im Kontext von Lichtraumprofilmessungen lassen sich die Ergebnisse einer kinematischen Objektraumerfassung parameterbasiert evaluieren. Dies erfolgt z. B. in Puente et al. [2016] unter Hinzunahme von Referenzwerten für den vertikalen Lichtraum in einem Tunnel. Schließlich sei auf die Arbeiten von Stenz et al. [2017, 2020] verwiesen, die aus den Punktwolken eines kinematischen Laserscanningsystems im Indoor-Bereich geometrische Objekte, wie Zylinder oder Paraboloide, extrahieren und mit Referenzdaten vergleichen.

Der Vorteil einer parameterbasierten Evaluierung liegt darin, dass das Endprodukt der kinematischen Datenerfassung evaluiert wird. Dieses Endprodukt ist in den meisten Fällen nicht die Punktwolke selbst, sondern

[2] 3D-Stadtmodelle bzw. 3D-Gebäudemodelle können auch zur Stützung der Trajektorienschätzung eingesetzt werden (siehe z. B. Bureick et al. [2019]; Dehbi et al. [2019] oder Vogel [2020]).

aus der Punktwolke abgeleitete Informationen (z. B. objektbeschreibende Parameter), die für anwendungsspezifische Fragestellungen benötigt werden. Insofern kann man den Standpunkt vertreten, dass die parameterbasierte Evaluierung die wichtigsten und aussagekräftigsten Aussagen zur Qualität eines kinematischen Multisensorsystems liefert, da sie aufzeigt, inwiefern ein System für eine spezielle Anwendung geeignet ist. Die Frage nach der Eignung eines Systems für eine spezielle Anwendung kann durch eine parameterbasierte Evaluierung häufig besser beantwortet werden, als dies mit punktbasierten oder flächenbasierten Evaluierungen der Fall ist, die das Multisensorsystem eher allgemein evaluieren. Allerdings bleiben die Aussagen parameterbasierter Evaluierungen dadurch natürlich auch zunächst auf bestimmte Anwendungsfälle beschränkt.

Zwischenfazit

Die Ausführungen zur Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning offenbaren eine breite Palette an Möglichkeiten, die jede für sich gewisse Vor- und Nachteile bietet. Vor diesem Hintergrund scheint eine Kombination der Ansätze sinnvoll, um das volle Potential aller verfügbaren Evaluierungsstrategien auszuschöpfen. Im Rahmen dieser Dissertation wird diese Idee aufgegriffen, indem alle drei Ansätze zur Anwendung kommen. Die punktbasierten und flächenbasierten Evaluierungsstrategien bewerten das Multisensorsystem in der Regel auf einer allgemeineren Ebene, während parameterbasierte Verfahren häufig bereits in Verbindung zur Anwendung stehen.

Alle drei Kategorien stellen im Wesentlichen eine empirische Evaluierung des Gesamtsystems dar, was in Anbetracht der Darstellungen in Abschnitt 1.1 als zielführende Methode zu erachten ist. Wie bereits Hauser et al. [2016] anmerken, sind die Strategien zur Evaluierung von Multisensorsystemen zwar vielfältig, aber nicht standardisiert. An diesem Umstand hat sich bis heute nichts verändert. Darüber hinaus sind Einrichtungen, die eine Evaluierung von Systemen ermöglichen, nur in begrenztem Maße vorhanden (siehe z. B. Barber et al. [2008]; Kaartinen et al. [2012]; Hofmann [2017] oder Stenz et al. [2017]). Daher verfolgt diese Dissertation das Ziel, durch den Aufbau einer Evaluierungseinrichtung bestehend aus Kontrollpunkten und TLS-Referenzpunktwolken verschiedene sich gegenseitig ergänzende Evaluierungsstrategien zusammenzuführen. Die Evaluierungsumgebung soll dauerhaft installiert und prinzipiell für verschiedenartige Multisensorsysteme zugänglich sein. Ergänzend dazu werden parameterbasierte Evaluierungen im Rahmen einer Anwendung aufgegriffen, bei der es um die Untersuchung der Ebenheit von Straßenoberflächen in Querrichtung geht.

3. Grundlagen

Diese Dissertation liefert Beiträge zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning. Hierbei liegt der Fokus auf dem Laserscanner als objektraumerfassender Komponente des Gesamtsystems. In diesem Kapitel werden mathematische, physikalische und geodätische Grundlagen erläutert, die zum Verständnis der Inhalte der Dissertation benötigt werden.

In Abschnitt 3.1 wird zunächst die allgemeine Georeferenzierungsgleichung zur Berechnung von Punktwolken aus den Beobachtungen eines kinematischen Laserscanningsystems eingeführt. Im Englischen wird die Georeferenzierungsgleichung auch manchmal mit dem Begriff *Kinematische Kette (engl. Kinematic Chain)* bezeichnet [Sheehan et al., 2012; Maddern et al., 2012]. In diesem Zusammenhang sind eine Reihe von Bezugssystemen sowie Transformationen notwendig. Anschließend thematisiert Abschnitt 3.2 das Unsicherheitsbudget beim Laserscanning sowie die funktionale und stochastische Modellierung der Distanzmessung des Laserscanners. Zudem werden die Probleme und Herausforderungen bei Messungen im Nahbereich diskutiert. Abschnitt 3.3 rekapituliert die Grundlagen der Parameterschätzung auf Basis einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten. Abschließend werden in Abschnitt 3.4 Qualitätsmaße zur Bewertung der Ausgleichungsergebnisse hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit eingeführt. Die Grundlagen zur Ausgleichungsrechnung spielen in dieser Dissertation bei den Beiträgen zur ebenenbasierten Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen dem Laserscanner und der GNSS/IMU-Einheit eine zentrale Rolle.

3.1 Bezugssysteme und Georeferenzierungsgleichung

Die Berechnung von Punktwolken aus den Daten eines kinematischen Laserscanningsystems umfasst die Fusion der Beobachtungen des Laserscanners und der georeferenzierenden Sensoren unter Berücksichtigung ihrer gegenseitigen Einbaulage auf der Trägerplattform. Dabei sind unterschiedliche Bezugssysteme zu beachten, deren Definition in Bezug auf Ursprung und Achsausrichtung in Tab. 3.1 zusammengefasst ist. Im Folgenden werden diese Bezugssysteme und die Transformationsschritte zwischen den Bezugssystemen erläutert.

Tabelle 3.1: Definition der benötigten Bezugssysteme zur Bestimmung einer georeferenzierten Punktwolke aus den Daten eines kinematischen Laserscanningsystems. Alle gelisteten Bezugssysteme sind kartesische Rechtssysteme.

Bezugssystem	**Ursprung**	**X-Achse**	**Y-Achse**	**Z-Achse**
s(ensor)**-frame**	Laserscanner	beliebig	beliebig	beliebig
b(ody)**-frame**	GNSS/IMU-Einheit	nach vorne	nach links	nach oben
n(avigation)**-frame**	GNSS/IMU-Einheit	nach Osten	nach Norden	lotrecht nach oben
l(ocal)**-frame**	lokal	nach Osten	nach Norden	lotrecht nach oben
e(arth)**-frame**	Geozentrum	Schnittgerade: Äquatorebene / Meridianebene Greenwich	ergänzt zu Rechtssystem	Rotationsachse der Erde

S(ensor)-Frame

Der Ausgangspunkt bei der Generierung von Punktwolken aus den Beobachtungen eines kinematischen Laserscanningsystems ist der Laserscanner. Die folgenden Darstellungen beziehen sich auf Profillaserscanner, die beim kinematischen Laserscanning typischerweise eingesetzt werden. Der Laserscanner besitzt neben der

Laserquelle einen rotierenden Umlenkspiegel, der den Laserstrahl in ein Scanprofil auffächert. In Abb. 3.1 rotiert dieser Umlenkspiegel um die X_s-Achse und lenkt den Laserstrahl unter dem Scanwinkel b_s in die Y_sZ_s-Ebene um. Der Laserstrahl wird im Objektraum an einer Oberfläche diffus reflektiert, läuft zum Laserscanner zurück und wird vom Laserscanner wieder registriert. Über die Laufzeit des Laserstrahl, den Phasenvergleich von ausgesandtem und empfangenem Laserstrahl oder einer Mischform dieser beiden Verfahren wird die Distanz d_s zur Objektoberfläche bestimmt. Mittels polarem Anhängen können aus den polaren Messelementen Distanz d_s und Scanwinkel b_s die kartesischen Objektkoordinaten $[x_s, y_s, z_s]^T$ berechnet werden, die zunächst im lokalen Bezugssystem des Laserscanners (s-frame) vorliegen. Die Ablenkung des Laserstrahls durch den Umlenkspiegel erfolgt in äquidistanten Winkelschritten Δb_s, sodass sich ein Scanprofil aus einer festen Anzahl diskreter Punkte zusammensetzt (siehe z. B. Vosselman & Maas [2010]; Shan & Toth [2018]). Im Falle eines Profillaserscanners, der wie in Abb. 3.1 dargestellt in der Y_sZ_s-Ebene misst, gilt:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ d_s \cdot \sin b_s \\ d_s \cdot \cos b_s \end{bmatrix} . \tag{3.1}$$

Die Objektraumerfassung mittels Laserscanning wird in Abschnitt 3.2 weiter vertieft. Dabei stehen die Differenzierung des funktionalen Modells aus Gl. (3.1), das stochastische Modell der Distanz- und Winkelmessung sowie das Verhalten des Laserstrahls im Nahbereich im Fokus.

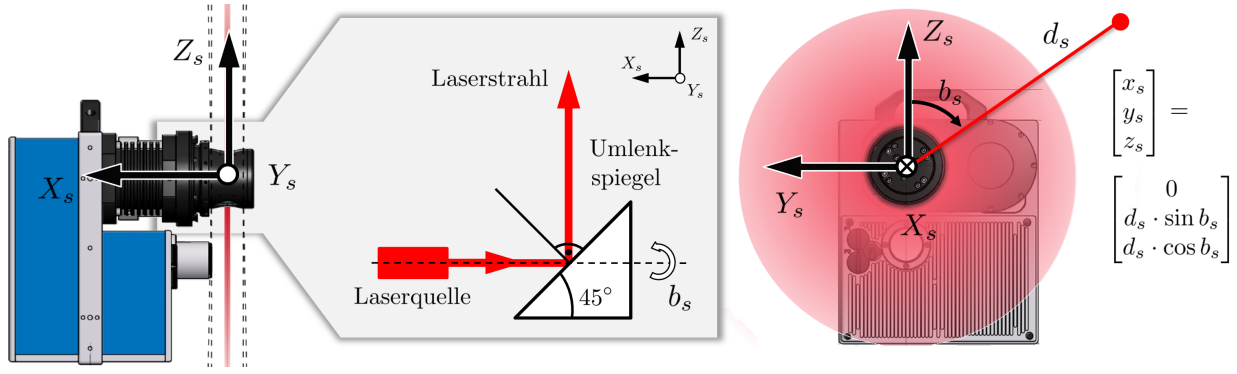


Abbildung 3.1: Bezugssystem des Profillaserscanners (s-frame). Aufgenommene Objektpunkte lassen sich entweder über kartesische Koordinaten $[x_s, y_s, z_s]^T$ oder Polarkoordinaten mit Distanz d_s und Scanwinkel b_s beschreiben (Quelle der Originalabbildungen des Laserscanners: Zoller & Fröhlich GmbH, Wangen im Allgäu, Deutschland).

B(ody)-Frame

Ausgehend vom Laserscanner (s-frame) werden die Objektpunkte in das plattformfeste Bezugssystem transformiert, welches auch als b(ody)-frame bezeichnet wird. Diese Transformation ist notwendig, weil sich die geschätzten Positions- und Orientierungsparameter der Plattform, die von den georeferenzierenden Sensoren bereitgestellt werden, auf das plattformfeste Bezugssystem beziehen. Das plattformfeste Bezugssystem wird meist durch das Bezugssystem der IMU bzw. der GNSS/IMU-Einheit realisiert. In Abb. 3.2 liegt der Ursprung des b-frames im Zentrum der IMU und die Koordinatenachsen sind entlang der sensitiven Achsen der IMU ausgerichtet, wobei die X_b-Achse in Bewegungsrichtung der Plattform zeigt, die Y_b-Achse nach links und die Z_b-Achse nach oben. Für die Transformation vom s-frame ins b-frame benötigt man den Hebelarm $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ sowie die drei Boresight-Winkel α, β und γ (Abb. 3.2, links), die auch als äußere Systemkalibrierung bezeichnet werden und die Einbaulage des Laserscanners auf der Plattform beschreiben [Vosselman & Maas, 2010]. Für die Transformation der Objektpunkte vom s-frame ins b-frame gilt:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}_s^b(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} , \tag{3.2}$$

$$\boldsymbol{R}_s^b(\alpha,\beta,\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\beta\cdot\cos\gamma & \cos\alpha\cdot\sin\gamma+\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\beta & \sin\alpha\cdot\sin\gamma-\cos\alpha\cdot\cos\gamma\cdot\sin\beta \\ -\cos\beta\cdot\sin\gamma & \cos\alpha\cdot\cos\gamma-\sin\alpha\cdot\sin\beta\cdot\sin\gamma & \cos\gamma\cdot\sin\alpha+\cos\alpha\cdot\sin\beta\cdot\sin\gamma \\ \sin\beta & -\cos\beta\cdot\sin\alpha & \cos\alpha\cdot\cos\beta \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Die Rotation $\boldsymbol{R}_s^b$ vom s-frame ins b-frame wird typischerweise durch die Verkettung von Rotationsmatrizen mit Eulerwinkeln repräsentiert. Allerdings sind auch andere Repräsentationen denkbar (z. B. Quaternionen). Der Hebelarm und die Boresight-Winkel werden für die Dauer einer Messung als konstant angesehen und müssen vorab im Rahmen einer Kalibrierung bestimmt werden. Dazu ist in dieser Dissertation ein ebenenbasiertes Kalibrierfeld mit einem zugehörigen Kalibrieransatz realisiert worden (siehe Abschnitte 5.2 und 5.4). Solange die Sensoranordnung auf der Trägerplattform nicht verändert wird, sind die Parameter der äußeren Systemkalibrierung konstant. Dies muss aber in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden.

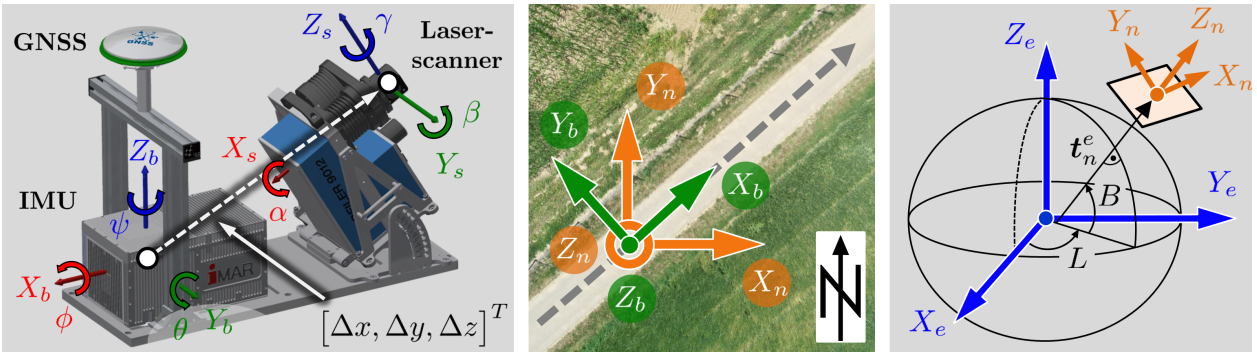


Abbildung 3.2: Unterschiedliche Bezugssysteme und Transformationsschritte zur Bestimmung einer georeferenzierten Punktwolke aus den Beobachtungen eines kinematischen Laserscanningsystems. Transformationsreihenfolge: s(ensor)-frame → b(ody)-frame → n(avigation)-frame → e(arth)-frame (Abbildung aus Heinz et al. [2020b]).

N(avigation)-Frame

Ausgehend vom b-frame lassen sich die Objektpunkte mithilfe der Orientierungswinkel der Trägerplattform in das n(avigation)-frame transformieren. Beim n-frame handelt es sich um ein nach Norden ausgerichtetes und lokal verebnetes, topozentrisches Bezugssystem, dessen Ursprung mit dem des b-frame übereinstimmt und das sich folglich mit der Plattform mitbewegt (Abb. 3.2, mittig).[3] Die Orientierungswinkel beschreiben einerseits die Neigung der Plattform in Querrichtung (Roll-Winkel ϕ) und Längsrichtung (Pitch-Winkel θ) sowie deren azimutale Orientierung bzw. den Kurswinkel (Yaw-Winkel ψ). Die Transformation zwischen b-frame und n-frame entspricht einer einfachen Rotation $\boldsymbol{R}_b^n$, die wiederum über die Verkettung von Rotationsmatrizen mit Eulerwinkeln repräsentiert wird [Vosselman & Maas, 2010; Wendel, 2011]:

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}_b^n(\phi,\theta,\psi)\cdot\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

$$\boldsymbol{R}_b^n(\phi,\theta,\psi) = \begin{bmatrix} \cos\theta\cdot\cos\psi & -\cos\phi\cdot\sin\psi+\sin\phi\cdot\sin\theta\cdot\cos\psi & \sin\phi\cdot\sin\psi+\cos\phi\cdot\sin\theta\cdot\cos\psi \\ \cos\theta\cdot\sin\psi & \cos\phi\cdot\cos\psi+\sin\phi\cdot\sin\theta\cdot\sin\psi & -\sin\phi\cdot\cos\psi+\cos\phi\cdot\sin\theta\cdot\sin\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cdot\cos\theta & \cos\phi\cdot\cos\theta \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Die Orientierungswinkel ϕ, θ und ψ werden von den georeferenzierenden Sensoren der Plattform bereitgestellt. Im Wesentlichen geschieht dies durch die Integration der Drehraten der Gyroskope der IMU. Hierbei

[3] In diesem Zusammenhang spricht man auch vom ENU-System (East-North-Up). Im Airborne Laserscanning wird hingegen das NED-System (North-East-Down) verwendet, das gegenüber dem ENU-System verdreht und nach unten ausgerichtet ist.

treten jedoch zwei wesentliche Probleme auf. Einerseits messen die Gyroskope nur Orientierungsänderungen, sodass Anfangswerte für die Orientierungswinkel bestimmt werden müssen, andererseits driftet die Orientierung über die Zeit, da sich neben dem eigentlichen Messsignal auch Sensorabweichungen aufintegrieren. Aus diesem Grund werden die Beobachtungen der Gyroskope in der Regel mit den Beobachtungen anderer Sensoren in einem Filteralgorithmus fusioniert, um sowohl die Drift zu begrenzen als auch die Problematik der Anfangswerte zu lösen. In einem solchen Filteralgorithmus kann außerdem Modellwissen über die erwartete Plattformbewegung integriert werden. Detaillierte Darstellungen diesbezüglich finden sich in einer Vielzahl an Publikationen sowie in einschlägigen Sammelwerken und Lehrbüchern (siehe z. B. Titterton & Weston [2004]; Wendel [2011]; Groves [2013] oder Teunissen & Montenbruck [2017]).

Zur Orientierungsbestimmung können neben den Gyroskopen der IMU grundsätzlich verschiedene Sensoren beitragen. Rückschlüsse auf die Neigungswinkel (Roll-Winkel ϕ und Pitch-Winkel θ) lassen sich aus dem lokalen Beschleunigungsvektor der Akzelerometer der IMU ziehen. Zur Bestimmung des Kurswinkels ψ können beispielsweise Magnetfeldsensoren eingesetzt werden. Magnetfeldsensoren sind aber durch magnetische Störeinflüsse in der Regel verhältnismäßig ungenau und liefern lediglich eine Näherung für den Kurswinkel [Klingbeil et al., 2014]. Eine weitere Möglichkeit zur Kurswinkelbestimmung ist der Einsatz von GNSS. Diesbezüglich können Positionsabfolgen genutzt werden, was jedoch bei hoher Dynamik und in Kurven zu ungenauen Ergebnissen führen kann. Vorteilhafter ist es, Geschwindigkeitsmessungen aus GNSS zu nutzen oder Multiantennensysteme zu verwenden, bei denen eine lokale Basislinie auf der Trägerplattform zur Bestimmung des Kurwinkels eingesetzt wird [Eling, 2016]. In diesem Zusammenhang können auch zwei orthogonale Basislinien entlang der X_b-Achse bzw. Y_b-Achse des b-frames ausgerichtet werden. Auf diese Weise ist man sensitiv gegenüber allen drei Orientierungswinkeln. Bei sehr genauen Inertialmesssystemen mit faseroptischen Gyroskopen oder Ringlasern besteht zudem die Möglichkeit, den Kurswinkel über ein Alignment bzw. Gyro-Compassing zu bestimmen. Dabei wird die Nordrichtung unter statischer Messung der Erdrotationsrate und Hinzunahme der bekannten Position der Plattform vor der Messung bestimmt.

L(ocal)-Frame und E(arth)-Frame

Schlussendlich werden die Objektpunkte in ein übergeordnetes Bezugssystem transformiert. Handelt es sich um ein kleines Anwendungsgebiet, kann dies ein lokal verebnetes Bezugssystem (l(ocal)-frame) sein, das nach Norden ausgerichtet ist. Die Transformation erfolgt dann durch eine einfache Translation mit dem verebneten Positionsvektor $\left[t_e, t_n, t_h\right]^T$ der Plattform:

$$\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_e \\ t_n \\ t_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix}. \tag{3.6}$$

Im Allgemeinen sind die Anwendungsgebiete kinematischer Multisensorsysteme aber größer und es ist ein globaler Koordinatenbezug von Nöten. In diesen Fällen erfolgt ausgehend vom n-frame eine Transformation in ein erdfestes, geozentrisches Koordinatensystem (e(arth)-frame), z. B. ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) (Abb. 3.2, rechts). Die Transformation vom n-frame ins e-frame setzt sich aus einer Rotation mit der ellipsoidischen Länge L und Breite B sowie einer Translation mit dem geozentrischen Positionsvektor $[t_x, t_y, t_z]^T$ der Plattform zusammen. Die Rotationsmatrix $\boldsymbol{R}_n^e(L, B)$ wird über die Verkettung der beiden Rotationsmatrizen für Länge und Breite mittels Eulerwinkeln repräsentiert [Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Vosselman & Maas, 2010]:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \boldsymbol{R}_n^e(L, B) \cdot \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix}, \tag{3.7}$$

$$\boldsymbol{R}_n^e(L, B) = \begin{bmatrix} -\sin L & -\sin B \cdot \cos L & \cos B \cdot \cos L \\ \cos L & -\sin B \cdot \sin L & \cos B \cdot \sin L \\ 0 & \cos B & \sin B \end{bmatrix}. \tag{3.8}$$

Der Positionsvektor $[t_x, t_y, t_z]^T$ sowie die ellipsoidische Länge L und Breite B werden genau wie die Orientierungswinkel ϕ, θ und ψ von den georeferenzierenden Sensoren der Plattform bereitgestellt. Typischerweise werden Position und Orientierung in einem gemeinsamen Filteralgorithmus bestimmt. Diesbezüglich sei wiederum auf einschlägige Sammelwerke und Lehrbücher verwiesen (siehe z. B. Titterton & Weston [2004]; Wendel [2011]; Groves [2013] oder Teunissen & Montenbruck [2017]).

Die Position kann durch zweifache Integration der Beschleunigungen der Akzelerometer einer IMU bestimmt werden. Allerdings besteht auch hier das Problem fehlender Anfangswerte sowie der Drift der Position durch aufintegrierte Sensorabweichungen. Daher wird die Positionsbestimmung in einem Filteralgorithmus – neben einer eventuellen Bewegungsmodellierung – durch die Beobachtungen anderer Sensoren gestützt. Häufig wird GNSS eingesetzt, wobei Verfahren unterschiedlicher Genauigkeit nutzbar sind (Single Point Positioning, differentielles GNSS, Precise Point Positioning (PPP) oder Real Time Kinematic (RTK)). Zur Erreichung hoher Genauigkeiten wird häufig auf RTK zurückgegriffen. Dabei erfolgt eine trägerphasenbasierte Positionsbestimmung der bewegten Plattform relativ zu einer koordinatenmäßig bekannten, statischen Referenzstation in Form einer Basislinie. In Abhängigkeit der Beobachtungsbedingungen sind Genauigkeiten im cm-Bereich erreichbar [Teunissen & Montenbruck, 2017]. Der Vorteil von GNSS liegt darin, dass es absolute Positionen liefert und sich durch eine hohe Langzeitstabilität auszeichnet. Auf diese Weise kann die Drift der inertialen Positionsschätzung begrenzt werden.

Problematisch beim Einsatz von GNSS ist jedoch, dass die Positionsgenauigkeit stark von den Umgebungsbedingungen abhängt (z. B. Abschattungen, Mehrwegeeffekte, etc.) und sich auch bei Nutzung von RTK bis in den m-Bereich verschlechtern kann. Häufig kommt es auch zu kompletten Signalausfällen (z. B. in Tunneln oder unter Brücken), sodass keine Positionsbestimmung mehr möglich ist. Im Gegensatz dazu stehen Messungen einer IMU praktisch immer und mit einer deutlich höheren Abtastrate zur Verfügung (GNSS < 20 Hz, IMU bis kHz). Über kurze Zeiträume ist die Drift einer IMU begrenzt, sodass schlechte oder lückenhafte GNSS-Beobachtungen überbrückt werden können. Durch die simultane Nutzung von GNSS und einer IMU ergeben sich somit Synergieeffekte. Durch die Kurzzeitstabilität der inertialen Messdaten und die Langzeitstabilität von GNSS erhält man eine lokal präzise und global genaue Trajektorienschätzung.

Neben GNSS und IMUs werden auch häufig Odometer eingesetzt, die zurückgelegte Weginkremente bestimmen. Ferner können Differentialodometer Orientierungsänderungen erfassen. Es sei angemerkt, dass auch die objekterfassenden Sensoren wie Kameras oder Laserscanner über visuelle Odometrie oder SLAM-Verfahren (Simultaneous Localization and Mapping) an der Trajektorienschätzung teilnehmen können. Diese Verfahren werden verstärkt im Bereich Robotik und für Indoor-Navigation eingesetzt [Stachniss, 2017].

Georeferenzierungsgleichung (*Kinematische Kette*)

Fügt man alle Transformationsschritte aus den vorangegangenen Abschnitten zusammen, erhält man die Georeferenzierungsgleichung zur Berechnung von Punktwolken aus den Daten eines kinematischen Laserscanningsystems. Die Georeferenzierungsgleichung wird im Englischen auch manchmal als *Kinematische Kette* (engl. *Kinematic Chain*) bezeichnet und lautet für das l-frame als übergeordnetem Bezugssystem:

$$\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_e \\ t_n \\ t_h \end{bmatrix} + \boldsymbol{R}_b^n(\phi, \theta, \psi) \cdot \left(\boldsymbol{R}_s^b(\alpha, \beta, \gamma \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \right). \tag{3.9}$$

Entsprechend gilt für das e-frame als übergeordnetem Bezugssystem:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \boldsymbol{R}_n^e(L, B) \cdot \boldsymbol{R}_b^n(\phi, \theta, \psi) \cdot \left(\boldsymbol{R}_s^b(\alpha, \beta, \gamma \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \right). \tag{3.10}$$

In der Praxis werden die georeferenzierten Objektpunkte $\left[x_e, y_e, z_e\right]^T$ im e-frame meist in anwendungsorientierte Koordinaten umgerechnet, z. B. UTM (Universale Transversale Mercator Projektion) für die Lage sowie ellipsoidische bzw. physikalische Höhen [Gruber & Joeckel, 2011].

3.2 Unsicherheitsbudget beim Laserscanning

Die Objektraumerfassung mittels Laserscanning erfolgt über ein polares Messverfahren. Im Falle eines Profillaserscanners wird der Objektraum innerhalb eines Scanprofils in festen Winkelschritten Δb_s abgetastet und zu jedem Scanwinkel b_s die zugehörige Distanz d_s zum Messobjekt bestimmt. Mithilfe der Messelemente Winkel b_s und Distanz d_s lassen sich dann kartesische Objektkoordinaten $[x_s, y_s, z_s]^T$ berechnen (siehe Abb. 3.1). Der Messvorgang beim Laserscanning unterliegt äußeren Einflüssen, die zu zufälligen und systematischen Messabweichungen führen und damit die Präzision und Richtigkeit der Messung bestimmen. In diesem Abschnitt werden die zufälligen und systematischen Messabweichungen beim Laserscanning zusammenfassend dargestellt und deren Bedeutung für die vorliegende Dissertation herausgearbeitet.

Systematische Messabweichungen

Systematische Messabweichungen verfälschen eine Messung mit konstantem Betrag und Vorzeichen. Grundsätzlich versucht man, systematische Messabweichungen durch eine Kalibrierung oder eine geeignete Messstrategie so weit wie möglich zu reduzieren oder vollständig zu eliminieren. Die Ursachen für systematische Messabweichungen beim Laserscanning lassen sich in vier Kategorien einteilen [Soudarissanane et al., 2011; Soudarissanane, 2016; Kuhlmann & Holst, 2017]. Wie Abb. 3.3 verdeutlicht, zählen dazu:

(i) Instrumentelle Einflüsse (Strahlablenkung, Distanzmessung und zeitliche Synchronisierung)

(ii) Atmosphärische Einflüsse (insbesondere Temperatur und Luftdruck)

(iii) Einflüsse aufgrund der Messkonfiguration (Distanz und Einfallswinkel)

(iv) Einflüsse aufgrund des Messobjektes (z. B. Material, Form, Farbe oder Rauigkeit)

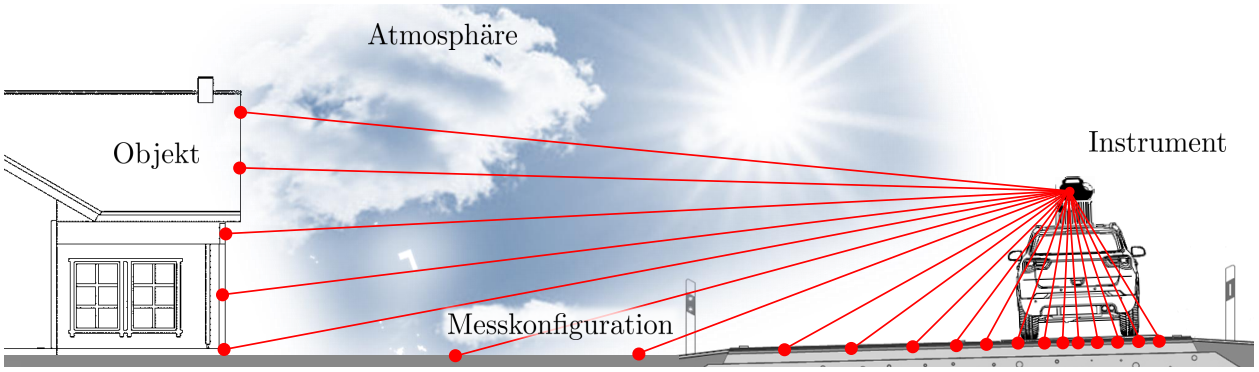


Abbildung 3.3: Einflussgrößen auf die Genauigkeit einer Messung beim Laserscanning. Während die Winkelmessung nur instrumentellen Einflüssen unterliegt, wirken sich Einflüsse aus allen vier Kategorien auf die Distanzmessung aus (Darstellung angelehnt an Soudarissanane [2016] und Kuhlmann & Holst [2017]).

Während die Winkelmessung nur von instrumentellen Abweichungen beeinträchtigt wird, wirken sich Einflüsse aus allen vier Kategorien auf die Distanzmessung aus. Instrumentelle Abweichungen betreffen sowohl die Winkel- als auch die Distanzmessung. Hierbei besteht aufgrund des ähnlichen Messverfahrens eine Analogie zu Tachymetern. Als die wichtigsten Einflussgrößen gelten die Zielachs-, Kippachs- und Höhenindexabweichung für die Winkelmessung sowie die Nullpunktabweichung für die Distanzmessung [Witte & Sparla, 2015; Kuhlmann & Holst, 2017]. Typischerweise werden Laserscanner von den Herstellern vor dem Einsatz kalibriert, wozu spezielle Kalibriermodelle [Vosselman & Maas, 2010; Muralikrishnan et al., 2015] und Kalibriermethoden [Vosselman & Maas, 2010; Holst et al., 2016; Medić et al., 2020] verwendet werden. Beim kinematischen Laserscanning ist die Kalibrierung des Herstellers in aller Regel ausreichend. Dies liegt unter anderem auch daran, dass die Unsicherheit der Trajektorienbestimmung verbleibende Systematiken des

Laserscanners für gewöhnlich übersteigt. Der Blick in die Literatur zeigt jedoch, dass innere Kalibrierparameter des Laserscanners häufig im Rahmen der äußeren Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel mitgeschätzt werden. Dies gilt sowohl im Bereich Airborne Laserscanning (siehe z. B. Filin [2003] oder Skaloud & Lichti [2006]) als auch für bodengebundene Systeme (siehe z. B. Glennie [2012] oder Hauser et al. [2016]). Dabei spielt insbesondere die Nullpunktabweichung d_0 des Laserscanners eine wichtige Rolle. Auch im Rahmen dieser Dissertation wird die Nullpunktabweichung d_0 des Laserscanners in das Kalibriermodell aufgenommen (siehe Heinz et al. [2017, 2020b]). Das funktionale Modell für einen Profillaserscanner aus Gl. (3.1) wird demnach wie folgt erweitert:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (d_s + d_0) \cdot \sin b_s \\ (d_s + d_0) \cdot \cos b_s \end{bmatrix}. \tag{3.11}$$

Neben den instrumentellen Abweichungen wird der Laserstrahl auf dem Weg zum Objekt und wieder zurück von der Atmosphäre beeinflusst. Variationen bezüglich Temperatur, Luftdruck und Feuchte können die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserstrahls verändern oder diesen aufgrund von Refraktion krümmen [Joeckel et al., 2008]. Aufgrund der kurzen Messdauer und den geringen Zielweiten beim kinematischen Laserscanning mit bodengebundenen Systemen (meist gilt $d_s < 100$ m) können die atmosphärischen Abweichungen jedoch in der Regel vernachlässigt bzw. durch Messung der atmosphärischen Parameter ausreichend gut korrigiert werden [Holst et al., 2016; Kuhlmann & Holst, 2017]. Auch beim Airborne Laserscanning ist es ausreichend, die Temperatur und den Luftdruck am Boden und in Flughöhe zu messen [Vosselman & Maas, 2010].

Wie die Ausführungen zur Genauigkeitsanalyse von Laserscannern in Abschnitt 2.1 verdeutlichen, existieren zahlreiche Arbeiten, die sich mit dem Einfluss der Messkonfiguration und der Objekteigenschaften auf die Genauigkeit von Laserscannermessungen beschäftigen. Hinsichtlich der Messkonfiguration sind insbesondere schräger werdende Einfallswinkel kritisch und können systematische Messabweichungen verursachen. Die entstehenden Abweichungen bei der Reflektion am Objekt sind jedoch darüber hinaus auch ganz wesentlich von der Beschaffenheit der Objektoberfläche abhängig. So ist es wichtig, dass die Oberfläche möglichst diffus reflektiert. Ferner sollte der Laserstrahl nicht in das Material eindringen, da die Distanzmessung ansonsten systematisch zu lang wird. Zudem ist die Größe des Laserspots in Bezug auf die Rauigkeit bzw. Form der Objektoberfläche bedeutend, da mit zunehmender Distanz der ausgeleuchtete Teil der Oberfläche aufgrund des sich aufweitenden Laserstrahls größer wird. Das reflektierte Signal ist ein Integral über den gesamten Laserspot, sodass es z. B. an Ecken und Kanten zu Ausrundungseffekten oder Mischsignalen kommen kann. Wie Holst et al. [2016] und Kuhlmann & Holst [2017] betonen, ist eine Generalisierung und Modellierung dieser Einflüsse äußerst schwierig und demzufolge einer der limitierenden Faktoren für die erreichbare Genauigkeit einer Laserscannermessung.

Zufällige Messabweichungen

Zufällige Messabweichungen unterscheiden sich von systematischen Messabweichungen dahingehend, dass sie nicht konstant in eine Richtung wirken, sondern hinsichtlich Betrag und Vorzeichen variieren. Folglich können zufällige Messabweichungen – nachfolgend auch als Messrauschen bezeichnet – nicht kalibriert oder über eine geeignete Messstrategie eliminiert werden; dafür lassen sie sich aber durch Mehrfachmessung mit anschließender Mittelbildung reduzieren. Beim Laserscanning besteht aufgrund des Messprinzips zwar grundsätzlich nicht die Möglichkeit, Wiederholungsmessungen für identische Punkte durchzuführen, allerdings werden die aufgenommenen Punktwolken meist über Modelle approximiert und das Messrauschen so reduziert.

Messrauschen wird von allen in Abb. 3.3 dargestellten Einflussgrößen hervorgerufen, wobei sich die einzelnen Einflussgrößen nicht ohne Weiteres voneinander trennen lassen. Kürzlich publizierte Arbeiten belegen, dass das Rauschen der Distanzmessung über die Intensität des zurückreflektierten Laserlichts beschrieben werden kann. In Wujanz et al. [2017, 2018] wird die Standardabweichung σ_d der Distanzmessung über die Intensität I des reflektierten Laserlichts mithilfe von drei Parametern a, b und c beschrieben:

$$\sigma_d = a \cdot I^b + c. \tag{3.12}$$

Der Zusammenhang aus Gl. (3.12) konnte in verschiedenen Arbeiten bestätigt werden [Lambertus et al., 2018; Schmitz et al., 2019]; so auch im Rahmen der vorliegenden Dissertation [Heinz et al., 2018c]. Die intensitätsbasierte stochastische Modellierung des Distanzmessrauschens kann mithilfe der Radar-Laser-Gleichung, die den Zusammenhang zwischen Sende- und Empfangsleistung bei lasergestützten Messungen in Abhängigkeit der Einflussgrößen aus Abb. 3.3 beschreibt, physikalisch untermauert werden. Trifft man die beim Laserscanning zulässige Annahme, dass die Objektoberfläche ein ausgedehnter Lambert'scher Reflektor mit homogenem, diffusem Rückstreuverhalten ist, und das Objekt zudem deutlich größer als der Durchmesser des Laserstrahls ist, erhält man über die Radar-Laser-Gleichung folgende Beziehung zwischen Sendeleistung P_S und Empfangsleistung P_E (siehe z. B. Jelalian [1992]; Höfle & Pfeifer [2007] oder Pfeifer et al. [2017]):

$$P_E = \frac{P_S \cdot D_E^2}{4\ d^2} \cdot \rho \cdot \cos\epsilon \cdot \eta_{ATM} \cdot \eta_{SYS}. \tag{3.13}$$

Anhand von Gl. (3.13) erkennt man, dass die Dämpfung des Signals von allen Einflussgrößen aus Abb. 3.3 abhängt: (i) Instrument: Durchmesser D_E der Empfangsapertur, Verlustfaktor η_{SYS} (z. B. durch Umwandlung eines optischen Signals in ein elektrisches Signal); (ii) Atmosphäre: Verlustfaktor η_{ATM}; (iii) Messkonfiguration: Distanz d, Einfallswinkel ϵ; (iv) Objekteigenschaften: Reflektionskoeffizient ρ.

Im Rahmen dieser Dissertation wird insbesondere die Präzision des Profillaserscanners Z+F Profiler 9012A [Zoller & Fröhlich GmbH, 2020] analysiert, weshalb die Signaldämpfung anhand dieses Sensors etwas detaillierter nachvollzogen werden soll. Gemäß Mettenleiter [2020] registriert die Avalanche-Photodiode (APD) des Z+F Profiler 9012A die Empfangsleistung P_E des zurückgestreuten Laserlichts und gibt einen dazu proportionalen Strom aus. Der nachgeschaltete Transimpedanzverstärker (TIA) macht daraus eine HF-Spannung (HF = Hochfrequenz), die wiederum in eine Intensität I digital gewandelt wird. Auf Basis der Spannung bzw. Intensität berechnet sich der Signaldämpfungsfaktor D aus dem Verhältnis zwischen der empfangenen Intensität I_E und der Aussteuerungsgrenze I_A der Systems (siehe z. B. Bishop [1977]):

$$D = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{I_E}{I_A}\right). \tag{3.14}$$

In Gl. (3.13) ist der quadratische Abfall der Empfangsleistung P_E mit der Distanz d der dominierende Faktor für die Dämpfung des Signals und führt zu einer Zunahme des Distanzmessrauschens mit der Entfernung. Die distanzabhängige Signaldämpfung ist in Abb. 3.4 für den Profillaserscanner Z+F Profiler 9012A dargestellt. Die rote Kurve zeigt die simulierte Signaldämpfung für ein System mit einer optischen Effizienz von 100 %. Man erkennt, dass bei Verdopplung der Messdistanz eine Dämpfung des Signals von -12 dB auftritt. Dieser Wert ergibt sich aufgrund des quadratischen Abfalls der Empfangsleistung mit der Distanz in Gl. (3.13) auch über Gl. (3.14): $D = 20 \cdot \log_{10}(0{,}25) \approx$ -12 dB.

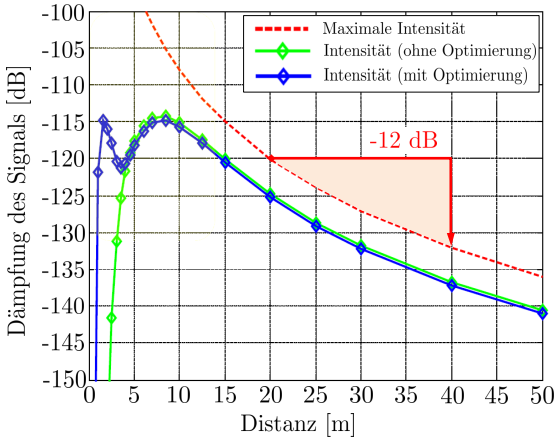


Abbildung 3.4: Simulation der distanzabhängigen Signaldämpfung für die optische Empfangseinheit des Z+F Profiler 9012 (grün) bzw. Z+F Profiler 9012A (blau) (Quelle der Originalabbildung: Zoller & Fröhlich GmbH, Wangen im Allgäu, Deutschland; Abbildung aus Heinz et al. [2018c], modifiziert).

Die rote Kurve in Abb. 3.4 ist das physikalische Limit. In der Realität ergibt sich die grüne Kurve. Die grüne Kurve in Abb. 3.4 bezieht sich auf den Profillaserscanner Z+F Profiler 9012 [Zoller & Fröhlich GmbH, 2020], welcher in seiner für den Nahbereich optimierten Variante Z+F Profiler 9012A (blaue Kurve in Abb. 3.4) im Rahmen dieser Dissertation verwendet und untersucht wurde [Heinz et al., 2017, 2020a,b]. Die Kurven in Abb. 3.4 können für andere Laserscanner abweichen; das prinzipielle Verhalten der Kurven sollte jedoch ähnlich sein (siehe z. B. Pfeifer et al. [2008] oder Zámečníková et al. [2014]). Die grüne Kurve in Abb. 3.4 folgt im Wesentlichen der Form der roten Kurve mit einem gewissen Offset, der durch die zusätzliche Dämpfung des Signals aufgrund der anderen Einflussgrößen in Gl. (3.13) verursacht wird (z. B. Einfallswinkel ϵ, Reflektionskoeffizient ρ). Offensichtlich gilt das $1/d^2$–Gesetz nur für mittlere und größere Entfernungen, nicht jedoch für den Nahbereich (hier: $d < 10$ m bis 15 m), da die grüne Kurve im Nahbereich steil abfällt. Dies hat zur Folge, dass das Distanzmessrauschen im Nahbereich erhöht ist. Der Abfall der grünen Kurve ist darauf zurückzuführen, dass der Intensitätsverlauf im Nahbereich ausschließlich von der Übertragungsfunktion der Optik bestimmt wird [Mettenleiter, 2020], wobei – hier bezogen auf den Z+F Profiler 9012A – zwei Effekte wesentlich sind:

1) Die optische Empfangseinheit des Laserscanners ist auf unendlich fokussiert. Dies führt im Nahbereich dazu, dass das zurückreflektierte Laserlicht nicht mehr parallel, sondern divergent auf die Avalanche-Photodiode (APD) einfällt, sodass nur noch ein Teil des einfallenden Laserlichts in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Im Nahbereich geht durch die Defokussierung mehr Laserlicht verloren als durch die Zunahme mit dem Quadrat der Distanz von der Apertur eingefangen wird.

2) Die optische Empfangseinheit ist koaxial aufgebaut, sodass die Apertur für den ausgesandten Laserstrahl im Zentrum des wieder einfallenden Laserlichts liegt. Die Apertur im Querschnitt des einfallenden Laserlichts bewirkt eine im Nahbereich zunehmende Verschattung der Avalanche-Photodiode (APD), sodass auch durch diesen Effekt im Nahbereich weniger Signalleistung aufgefangen wird.

Eine Diskussion der Effekte im Nahbereich findet sich auch in Pfeifer et al. [2008]. Das Verhalten im Nahbereich hat zur Folge, dass lasergestützte Distanzmessungen bei kurzen Zielweiten ein erhöhtes Messrauschen aufweisen. Der in dieser Dissertation verwendete Profillaserscanner Z+F Profiler 9012A ist mit einer speziellen Nahbereichsoptimierung ausgestattet, die die Empfangsleistung im Nahbereich durch eine Modifikation der optischen Empfangseinheit verbessert, sodass das Distanzmessrauschen verringert wird. Dies ist in Abb. 3.4 durch die blaue Kurve angezeigt. Die Nahbereichsoptimierung wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation in Heinz et al. [2018c] detailliert analysiert. Im Kontext von kinematischem Laserscanning ist das Rauschverhalten der Distanzmessung im Nahbereich für eine Reihe von Anwendungen bedeutsam. So ist man bei der Bestimmung von Lichtraumprofilen oder bei der Vermessung von Straßenoberflächen meist mit sehr kurzen Zielweiten < 5 m konfrontiert. In diesen Fällen sollte das erhöhte Messrauschen im stochastischen Modell des Laserscanners korrekt abgebildet werden. Im Rahmen dieser Dissertation wurde dieser Aspekt in Heinz et al. [2020a] thematisiert. In der genannten Publikation wurden für zwei 6 km lange Teilabschnitte einer Autobahn Straßenzustandsparameter in Form der Straßenquerneigung, der Spurrinnentiefe und der fiktiven Wassertiefe aus den Punktwolken eines kinematischen Laserscanningsystems bestimmt.

3.3 Allgemeinfall der Ausgleichung

Der im Rahmen dieser Dissertation verwendete ebenenbasierte Kalibrieransatz basiert auf einer Parameterschätzung nach kleinsten Quadraten im Gauß-Helmert Modell. Gemeinhin spricht man in diesem Kontext auch vom Allgemeinfall der Ausgleichung [Niemeier, 2008]. Der Allgemeinfall der Ausgleichung wird in zahlreichen Lehrbüchern beschrieben (siehe z. B. Mikhail & Ackermann [1976]; Koch [1999] oder Förstner & Wrobel [2016]). Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts wird der Berechnungsablauf beim Allgemeinfall der Ausgleichung dargestellt. Die Darstellungen sind den oben genannten Quellen entnommen.

Die Grundlage der Parameterschätzung im Gauß-Helmert Modell bildet ein impliziter funktionaler Zusammenhang $f(\tilde{\boldsymbol{l}}, \tilde{\boldsymbol{p}}) = 0$ zwischen den Beobachtungen $\boldsymbol{l}$ und den Parametern $\boldsymbol{p}$. Dabei steht die Tilde $(\tilde{\cdot})$ für die

wahren Größen, die jedoch allgemein unbekannt sind. Man spricht beim funktionalen Zusammenhang f auch häufig von der so genannten Beobachtungsgleichung. Aufgrund von Beobachtungsabweichungen kommt es zu Inkonsistenzen im funktionalen Zusammenhang, sodass Verbesserungen $\boldsymbol{v}$ für die tatsächlich durchgeführten Beobachtungen eingeführt werden müssen. Es gilt dann:

$$f(\boldsymbol{l} + \hat{\boldsymbol{v}}, \hat{\boldsymbol{p}}) = f(\hat{\boldsymbol{l}}, \hat{\boldsymbol{p}}) \stackrel{!}{=} 0. \tag{3.15}$$

Hierbei steht der Zirkumflex ($\hat{}$) für geschätzte bzw. ausgeglichene Größen. Häufig sind die Beobachtungsgleichungen nicht linear, sodass zunächst eine Linearisierung des funktionalen Zusammenhangs nach Taylor vorgenommen wird, wobei $\boldsymbol{p}_0$ und $\boldsymbol{l}_0$ den Taylorpunkt kennzeichnen. Dies führt dazu, dass die Ausgleichung iterativ durch Schätzung von Parameterzuschlägen $\Delta\hat{\boldsymbol{p}}$ auf Basis von verkürzten Beobachtungen $\Delta\hat{\boldsymbol{l}}$ erfolgt. Für die Linearisierung der Beobachtungsgleichung gilt[4]:

$$f(\boldsymbol{l}_0, \boldsymbol{p}_0) + \boldsymbol{A}\Delta\hat{\boldsymbol{p}} + \boldsymbol{B}\Delta\hat{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{0}, \tag{3.16}$$

$$\hat{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{p}_0 + \Delta\hat{\boldsymbol{p}}, \tag{3.17}$$

$$\hat{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{l}_0 + \Delta\hat{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{l} + \hat{\boldsymbol{v}}. \tag{3.18}$$

Hierbei umfasst die Designmatrix $\boldsymbol{A}$ die partiellen Ableitungen des funktionalen Zusammenhangs nach den Parametern und die Bedingungsmatrix $\boldsymbol{B}$ die partiellen Ableitungen des funktionalen Zusammenhangs nach den Beobachtungen:

$$\boldsymbol{A} = \left.\frac{\partial f(\boldsymbol{l}, \boldsymbol{p})}{\partial \boldsymbol{p}}\right|_{\boldsymbol{p}_0, \boldsymbol{l}_0}, \tag{3.19}$$

$$\boldsymbol{B} = \left.\frac{\partial f(\boldsymbol{l}, \boldsymbol{p})}{\partial \boldsymbol{l}}\right|_{\boldsymbol{p}_0, \boldsymbol{l}_0}. \tag{3.20}$$

Man kann zeigen, dass für normalverteilte Beobachtungen die Minimierung der mit der Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{ll}$ der Beobachtungen gewichteten Verbesserungsquadratsumme $\hat{\boldsymbol{v}}^T\boldsymbol{\Sigma}_{ll}^{-1}\hat{\boldsymbol{v}}$ zu folgendem besten, linearen und erwartungstreuen Schätzer für die Parameterzuschläge $\Delta\hat{\boldsymbol{p}}$ führt [Förstner & Wrobel, 2016]:

$$\Delta\hat{\boldsymbol{p}} = \left[\boldsymbol{A}^T\left(\boldsymbol{B}\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T\right)^{-1}\boldsymbol{A}\right]^{-1}\boldsymbol{A}^T\left(\boldsymbol{B}\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T\right)^{-1}\left(\boldsymbol{B}\boldsymbol{v}_0 - f(\boldsymbol{l}_0, \boldsymbol{p}_0)\right), \quad \text{mit} \quad \boldsymbol{v}_0 = \boldsymbol{l}_0 - \boldsymbol{l}. \tag{3.21}$$

Substituiert man $\boldsymbol{\Sigma}_{\overline{ll}} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T$ und führt darüber hinaus den Widerspruchsvektor $\boldsymbol{w} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{v}_0 - f(\boldsymbol{l}_0, \boldsymbol{p}_0)$ ein, erkennt man, dass sich das Gauß-Helmert Modell auf ein Gauß-Markov Modell zurückführen lässt [Mikhail & Ackermann, 1976; Koch, 1999; Förstner & Wrobel, 2016]. Dies ist insbesondere bei sehr großen Normalgleichungssystemen – wie es bei Anwendungen im Bereich Laserscanning häufig der Fall ist – sehr hilfreich, weil sich die Dimension des Normalgleichungssystems auf die Anzahl der Parameter reduziert und damit hinsichtlich der Rechenkomplexität mit deutlich weniger Aufwand gelöst werden kann. Eine Diskussion und Anwendung der Rückführung auf ein Gauß-Markov Modell im Rahmen der Auswertung von TLS-Scans eines Radioteleskops findet sich z. B. in Holst et al. [2014].

[4] Als Taylorpunkt für die Linearisierung werden im strengen Gauß-Helmert Modell die aktuell geschätzten Parameter $\hat{\boldsymbol{p}}$ und die ausgeglichenen Beobachtungen $\hat{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{l} + \hat{\boldsymbol{v}}$ verwendet [Lenzmann & Lenzmann, 2004]. Die geschätzten Verbesserungen $\hat{\boldsymbol{v}}$ für die Beobachtungen $\boldsymbol{l}$ werden hierbei gemäß Gl. (3.18) berechnet. Da in der ersten Iteration weder $\hat{\boldsymbol{p}}$ noch $\hat{\boldsymbol{v}}$ zur Verfügung stehen, wird zu Beginn an vorzugebenden Näherungsparametern $\boldsymbol{p_0}$ und den ursprünglichen Beobachtungen $\boldsymbol{l}_0 = \boldsymbol{l}$ linearisiert.

Neben den Parametern kann im Zuge der Ausgleichung auch deren Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{p}\hat{p}}$ berechnet werden, die die geschätzten Varianzen und Kovarianzen der Parameter beinhaltet:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{p}\hat{p}} = \left[\boldsymbol{A}^T \left(\boldsymbol{B}\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T \right)^{-1} \boldsymbol{A} \right]^{-1}. \tag{3.22}$$

Die geschätzten Verbesserungen $\hat{\boldsymbol{v}}$ mitsamt ihrer Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{v}\hat{v}}$ ergeben sich schließlich wie folgt:

$$\hat{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T \left(\boldsymbol{B}\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T \right)^{-1} \left(\boldsymbol{w} - \boldsymbol{A}\Delta\hat{\boldsymbol{p}} \right), \tag{3.23}$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{v}\hat{v}} = \boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T \left[\left(\boldsymbol{B}\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T \right)^{-1} - \left(\boldsymbol{B}\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T \right)^{-1} \boldsymbol{A}\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{p}\hat{p}}\boldsymbol{A}^T \left(\boldsymbol{B}\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T \right)^{-1} \right] \boldsymbol{B}\boldsymbol{\Sigma}_{ll}. \tag{3.24}$$

Mithilfe der geschätzten Parameterzuschläge $\Delta\hat{\boldsymbol{p}}$ und den geschätzten Verbesserungen $\hat{\boldsymbol{v}}$ lassen sich über Gl. (3.17) die geschätzten Parameter $\hat{\boldsymbol{p}}$ und über Gl. (3.18) die ausgeglichenen Beobachtungen $\hat{\boldsymbol{l}}$ berechnen. Diese dienen in der nächsten Iteration als Taylorpunkt für die Linearisierung. Die iterative Schätzung der Parameter und Verbesserungen endet, sobald sich die Parameterzuschläge nicht mehr signifikant ändern bzw. die Ausgleichung konvergiert ist.

3.4 Qualitätsmaße in der Ausgleichung

Das Ergebnis einer Parameterschätzung nach kleinsten Quadraten (siehe Abschnitt 3.3) kann mithilfe verschiedener Qualitätsmaße hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit bewertet werden [Niemeier, 2008]. Die Zuverlässigkeit meint in diesem Zusammenhang die Robustheit der Ausgleichung gegenüber Ausreißern in den Beobachtungen. In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Maße zur Bewertung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Parameterschätzung eingeführt, die im Rahmen der vorliegenden Dissertation zur Analyse und Verbesserung der Konfiguration der ebenenbasierten Kalibrierung eingesetzt werden.

Genauigkeit

Im Rahmen der Ausgleichung besteht die Möglichkeit, eine Genauigkeit für die geschätzten Parameter $\hat{\boldsymbol{p}}$ anzugeben. Dies geschieht in Form der Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{p}\hat{p}}$, die sich nach Gl. (3.22) berechnet. Die Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{p}\hat{p}}$ beinhaltet auf der Hauptdiagonalen die Varianzen $\sigma^2_{p_i}$, die die Genauigkeit der einzelnen Parameter p_i anzeigen. Auf den Nebendiagonalen finden sich die zugehörigen Kovarianzen σ_{p_i,p_j}:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{p}\hat{p}} = \begin{bmatrix} \sigma^2_{p_1} & \sigma_{p_1,p_2} & \cdots & \sigma_{p_1,p_n} \\ \sigma_{p_2,p_1} & \sigma^2_{p_2} & \cdots & \sigma_{p_2,p_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{p_n,p_1} & \sigma_{p_n,p_2} & \cdots & \sigma^2_{p_n} \end{bmatrix}. \tag{3.25}$$

Aus den Varianzen und Kovarianzen lassen sich die Korrelationskoeffizienten $\kappa_{p_i,p_j} \in [-1,1]$ zwischen den Parametern berechnen. Der Korrelationskoeffizient zeigt die lineare Abhängigkeit zwischen zwei Parametern an und ist daher ein Maß für die Trennbarkeit der beiden Parameter [Niemeier, 2008]:

$$\kappa_{p_i,p_j} = \frac{\sigma_{p_i,p_j}}{\sigma_{p_i} \cdot \sigma_{p_j}}. \tag{3.26}$$

Hinsichtlich der Varianzen und Korrelationen werden betragsmäßig kleine Werte angestrebt. Ein Korrelationswert κ nahe Null zeigt eine gute Trennbarkeit der Parameter an. Die Kovarianzmatrix der Parameter ist das zentrale Maß zur Bewertung der Genauigkeit der Parameterschätzung. Damit die Schätzung der Parameter und insbesondere ihrer Kovarianzmatrix erwartungstreu ist, dürfen keine Modellfehler im funktionalen Modell f bzw. stochastischen Modell $\boldsymbol{\Sigma}_{ll}$ vorhanden sein (siehe Abschnitt 3.3). Dies kann über den geschätzten a posteriori Varianzfaktor $\hat{s}^2$ geprüft werden, der die geschätzte Beobachtungsgenauigkeit widerspiegelt und sich gemäß Gl. (3.27) einem statistischen Globaltest unterziehen lässt:

$$T = \frac{\hat{s}^2}{\sigma_0^2} = \frac{\hat{\boldsymbol{v}}^T \boldsymbol{Q}_{ll}^{-1} \hat{\boldsymbol{v}}}{r \cdot \sigma_0^2} = \frac{\hat{\boldsymbol{v}}^T \boldsymbol{\Sigma}_{ll}^{-1} \hat{\boldsymbol{v}}}{r} \quad \text{mit} \quad \mathcal{T} \mid H_0 \sim \mathcal{F}_{r,\infty}. \tag{3.27}$$

In Gl. (3.27) beschreibt T die Testgröße des Globaltestes, $\hat{s}^2$ den a posteriori Varianzfaktor, σ_0^2 den a priori Varianzfaktor, $\boldsymbol{Q}_{ll}$ die Kofaktormatrix der Beobachtungen, r die Redundanz der Ausgleichung und $\mathcal{T}$ die zur Testgröße gehörende Zufallsvariable, für die als Nullhypothese H_0 angenommen wird, dass sie einer Fisher-Verteilung $\mathcal{F}$ mit r und unendlich vielen Freiheitsgraden folgt. Wird der Globaltest angenommen, sind keine Modellfehler nachweisbar und die Schätzung gilt als erwartungstreu mit minimaler Varianz [Niemeier, 2008].

Zuverlässigkeit

Neben der Genauigkeit der Schätzung kann auch deren Zuverlässigkeit beurteilt werden. Die Zuverlässigkeit wird in diesem Zusammenhang in innere und äußere Zuverlässigkeit unterteilt. Bei der inneren Zuverlässigkeit geht es um die Frage, inwieweit grobe Fehler in den Beobachtungen in der Ausgleichung detektiert werden können [Niemeier, 2008; Förstner & Wrobel, 2016]. Folglich wird die innere Zuverlässigkeit im Beobachtungsraum analysiert. Ein wichtiges Maß zur Bewertung der inneren Zuverlässigkeit stellen hierbei die Redundanzanteile r_i dar [Förstner, 1979, 1987]. Die Redundanzanteile können für jede Beobachtung l_i gemäß Gl. (3.28) berechnet werden, wobei $\boldsymbol{\Sigma}_{ll}$ die Kovarianzmatrix der Beobachtungen repräsentiert und $\boldsymbol{\Sigma}_{vv}$ die Kovarianzmatrix der Verbesserungen aus Gl. (3.24) ist:

$$\begin{aligned} r_i &= \left(\boldsymbol{\Sigma}_{vv} \boldsymbol{\Sigma}_{ll}^{-1}\right)_{ii} \\ &= \left(\boldsymbol{\Sigma}_{ll} \boldsymbol{B}^T \left(\boldsymbol{B} \boldsymbol{\Sigma}_{ll} \boldsymbol{B}^T \right)^{-1} \left[\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A} \left(\boldsymbol{A}^T \left(\boldsymbol{B} \boldsymbol{\Sigma}_{ll} \boldsymbol{B}^T \right)^{-1} \boldsymbol{A} \right)^{-1} \boldsymbol{A}^T \left(\boldsymbol{B} \boldsymbol{\Sigma}_{ll} \boldsymbol{B}^T \right)^{-1} \right] \boldsymbol{B} \right)_{ii}. \end{aligned} \tag{3.28}$$

Redundanzanteile liegen für unkorrelierte Beobachtungen im Intervall $r_i \in [0, 1]$ und beschreiben den Anteil einer Beobachtung an der Gesamtredundanz r der Ausgleichung. Demzufolge gilt $\sum r_i = r$. Der wesentliche Nutzen der Redundanzanteile r_i besteht darin, dass sie quantifizieren, welcher Anteil einer Abweichung oder eines groben Fehlers einer Beobachtung l_i nach der Ausgleichung in der eigenen Verbesserung v_i landet. Folglich erhöhen große Redundanzanteile die Wahrscheinlichkeit, dass ein grober Fehler anhand einer erhöhten Verbesserung detektiert werden kann, wohingegen bei kleinen Redundanzanteilen grobe Fehler unter Umständen unerkannt bleiben, weil sie sich auf andere Verbesserungen oder schlimmer noch auf die Parameter verteilen. In der klassischen geodätischen Netzausgleichung werden auch aus Gründen der Wirtschaftlichkeit Redundanzanteile im Bereich 0,3 bis 0,7 als ausreichend angesehen [Niemeier, 2008].

Auf Basis der Redundanzanteile lässt sich berechnen, wie groß ein grober Fehler sein muss, damit dieser in einem Ausreißertest detektiert werden kann. Unter der Annahme, dass man die normierten Verbesserungen w_i, die sich durch Normierung der Verbesserung v_i mit ihrer Standardabweichung $\sigma_{v_i} \in \boldsymbol{\Sigma}_{vv}$ ergeben, und für die die Hypothese H_0 gilt, dass die zugrunde liegende Zufallsvariable $\mathcal{W}$ der Standardnormalverteilung $\mathcal{N}(0, 1)$ folgt, auf signifikante Abweichungen vom Erwartungswert Null testet, ergibt sich der kleinste aufdeckbare grobe Fehler ∇l_i wie folgt [Baarda, 1967, 1968; Niemeier, 2008]:

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \quad \text{mit} \quad \mathcal{W} \mid H_0 \sim \mathcal{N}(0, 1), \tag{3.29}$$

$$\nabla l_i = \delta_0(\alpha_T, \beta_T) \cdot \frac{\sigma_{l_i}}{\sqrt{r_i}}, \tag{3.30}$$

wobei $\sigma_{l_i} \in \boldsymbol{\Sigma}_{ll}$ die Standardabweichung der Beobachtung ist und r_i ihr Redundanzanteil. Man erkennt anhand von Gl. (3.30), dass der kleinste aufdeckbare grobe Fehler ∇l_i mit steigendem Redundanzanteil kleiner wird, sodass sich die Wahrscheinlichkeit grobe Fehler zu finden erhöht. Die Größe δ_0 wird als Nichtzentralitätsparameter bezeichnet und ist eine Funktion der Irrtumswahrscheinlichkeit α_T des Ausreißertests auf der Grundlage der normierten Verbesserung (siehe Gl. (3.29)) und der Testgüte $\gamma_T = 1 - \beta_T$ bezogen auf die Alternativhypothese. Dabei kennzeichnet β_T die Irrtumswahrscheinlichkeit 2. Art [Niemeier, 2008].

Das Ziel der Ausgleichung besteht darin, die Parameterschätzung möglichst unbeeinflusst von groben Fehlern durchzuführen. In diesem Zusammenhang ermöglichen es die Redundanzanteile und die daraus abgeleiteten kleinsten aufdeckbaren groben Fehler, festzustellen, ob und wie gut grobe Fehler detektiert werden können. Interessant im Rahmen der Parameterschätzung ist jedoch häufig die Frage, wie grobe Fehler, die gerade nicht mehr detektierbar sind, die Erwartungstreue der Schätzung beeinträchtigen. Zur Beantwortung dieser Frage kann der kleinste aufdeckbare grobe Fehler über Gl. (3.31) auf die geschätzten Parameter propagiert werden [Niemeier, 2008; Förstner & Wrobel, 2016]. Man erhält auf diese Weise den Einflussvektor $\nabla \boldsymbol{p}_i$, der als Maß für die äußere Zuverlässigkeit gilt, da er die Zuverlässigkeit im Parameterraum beschreibt:

$$\nabla \boldsymbol{p}_i = \left[\boldsymbol{A}^T \left(\boldsymbol{B} \boldsymbol{\Sigma}_{ll} \boldsymbol{B}^T \right)^{-1} \boldsymbol{A} \right]^{-1} \boldsymbol{A}^T \left(\boldsymbol{B} \boldsymbol{\Sigma}_{ll} \boldsymbol{B}^T \right)^{-1} \boldsymbol{B} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \nabla l_i \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{3.31}$$

Mithilfe des Einflussvektors $\nabla \boldsymbol{p}_i$ lässt sich quantifizieren, welche maximalen Parameterveränderungen ein nicht detektierbarer grober Fehler hervorruft. Man erkennt anhand von Gl. (3.31), dass sich ein grober Fehler grundsätzlich auf alle Parameter auswirken kann. Der Einfluss hängt von der Struktur des Normalgleichungssystems ab, welches sich aus der Konfiguration der Ausgleichung in Form des funktionalen Modells (Designmatrix $\boldsymbol{A}$ und Bedingungsmatrix $\boldsymbol{B}$) und des stochastischen Modells (Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{ll}$) ergibt.

Konfigurationsanalyse

Betrachtet man die Maße für Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit, welche in diesem Abschnitt eingeführt wurden, erkennt man, dass diese Maße im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängen:

1) Funktionales Modell (Designmatrix $\boldsymbol{A}$ und Bedingungsmatrix $\boldsymbol{B}$),
2) Stochastisches Modell (Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{ll}$).

Das funktionale Modell sowie das stochastische Modell legen zusammen die Konfiguration der Ausgleichung fest. Die Maße für Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit erlauben es nun, diese Konfiguration zu bewerten. Auf Grundlage einer solchen Bewertung können Anpassungen im funktionalen oder stochastischen Modell vorgenommen werden, sodass sich die Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit der Parameterschätzung verbessert. Diese Vorgehensweise ist in der Geodäsie als Konfigurationsanalyse bekannt und wurde in der Vergangenheit für vielfältige Aufgaben eingesetzt, z. B. Planung von geodätischen Netzen [Niemeier, 2008], Erstellung von Beobachtungsplänen für VLBI (Very Long Baseline Interferometry) [Leek et al., 2015], Flächenapproximationen [Holst, 2015] oder Kalibrierung von Messarmen [Dupuis et al., 2017] und Laserscannern [Medić et al., 2020].

Im Falle der ebenenbasierten Kalibrierung von kinematischen Laserscanningsystemen, wie sie im Rahmen der vorliegenden Dissertation Anwendung findet, wird das funktionale Modell durch die Trajektorie und die

Georeferenzierungsgleichung des kinematischen Laserscanningsystems (vgl. Abschnitt 3.1) sowie durch die Anordnung der Ebenen festgelegt. Das stochastische Modell ergibt sich aus der Genauigkeit der beteiligten Sensoren bzw. der Genauigkeit der Sensordatenfusion (z. B. Bestimmung der Trajektorienparameter mittels Kalman-Filterung). Das stochastische Modell beim kinematischen Laserscanning ist jedoch nur unzureichend bekannt und unterliegt zudem einer räumlichen und zeitlichen Variation. Demnach ist eine Konfigurationsanalyse in Hinblick auf das stochastische Modell schwierig. Im Gegensatz dazu kann das funktionale Modell durch die Anordnung der Ebenen und die Art und Weise ihrer Aufnahme fast beliebig verändert werden. An diesem Punkt greift die vorliegende Dissertation an, indem sie die geodätischen Qualitätsmaße für Genauigkeit und Zuverlässigkeit anwendet, um die Konfiguration bei der ebenenbasierten Kalibrierung von kinematischen Laserscanningsystemen objektiv zu bewerten und zu verbessern. Auf diese Weise soll eine genaue, zuverlässige und sensitive Schätzung der Kalibrierparameter mit möglichst geringen Korrelationen sichergestellt werden.

4. Zusammenfassungen der relevanten Publikationen

In diesem Kapitel werden die fünf wissenschaftlich begutachteten Publikationen (A – E) zusammengefasst, die die Grundlage der vorliegenden kumulativen Dissertation bilden. Wie man Abb. 4.1 entnehmen kann, können die Inhalte dieser Publikationen zwei größeren Themenbereichen zugeordnet werden. Dabei handelt es sich zum einen um die Kalibrierung und zum anderen um die Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning. In beiden Strängen hat ausgehend von Publikation A eine Entwicklung stattgefunden, die mit den vertikalen Pfeilen gekennzeichnet wird. Während diese Entwicklung im Themenbereich Kalibrierung von Publikation A über Publikation B nach Publikation E sehr geradlinig ist, sind die Zusammenhänge im Themenbereich Evaluierung vernetzt. In den Publikationen A, B und D werden verschiedene Evaluierungsstrategien für kinematische Laserscanningsysteme angewendet, die in Publikation E zusammengeführt werden. Publikation C hat einen Sonderstatus, da in dieser Publikation die Stochastik des Laserscanners als Einzelkomponente des Systems evaluiert wird. Die darin gewonnenen Erkenntnisse haben Bedeutung für Anwendungen im Bereich Straßenzustandserfassung, wie in Publikation D gezeigt wird.

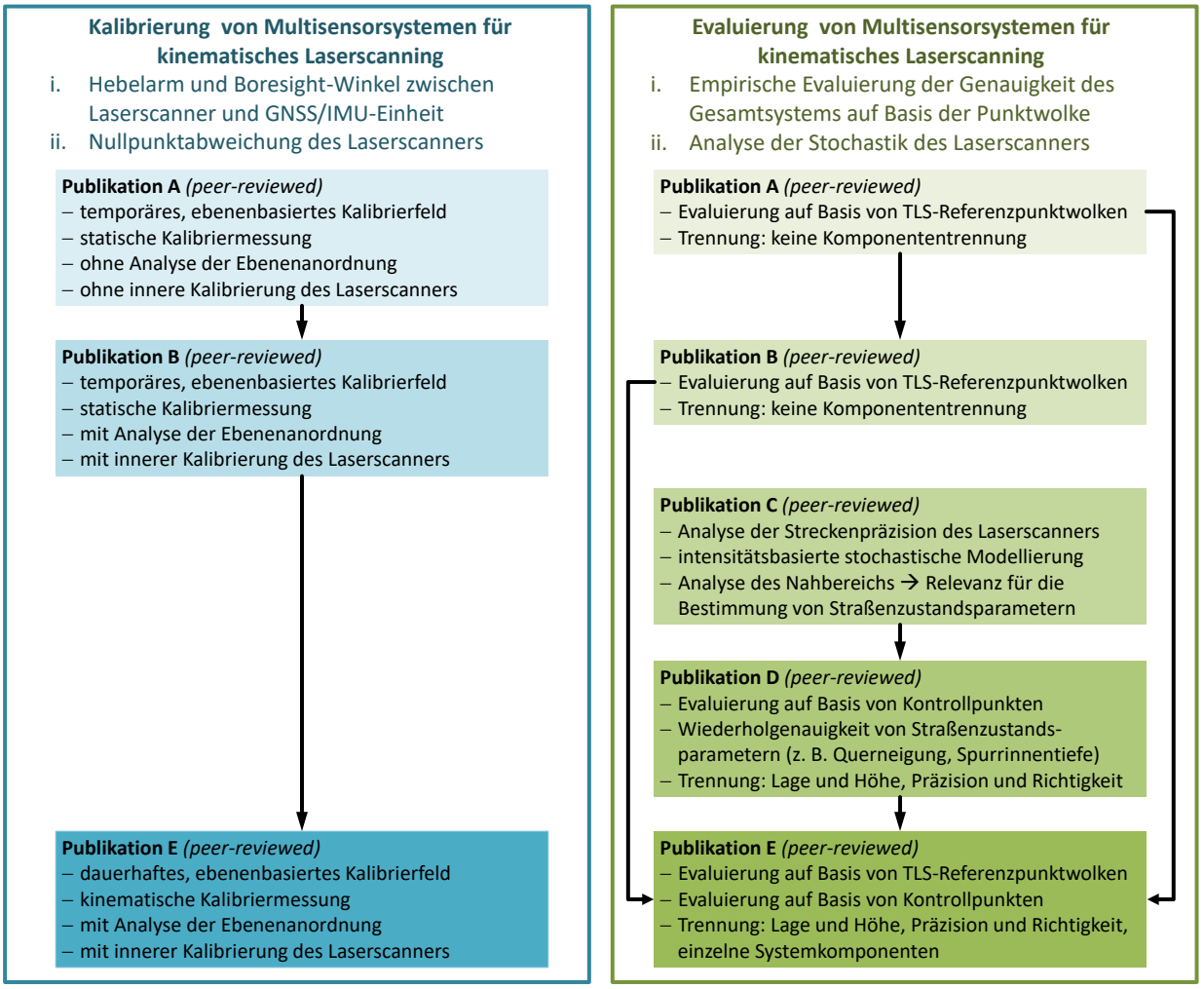


Abbildung 4.1: Kategorisierung und inhaltliche Verbindung der fünf relevanten Publikationen A – E.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation sind am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn darüber hinaus zwei unterschiedliche Multisensorsysteme für kinematisches Laserscanning entwickelt worden. Dabei handelt es sich einerseits um ein leichtes, tragbares low-cost Laserscanningsystem (Publikation A; siehe Abb. 5.1) und andererseits um ein fahrzeuggetragenes Mobile Mapping System (Publikationen B, D und E; siehe Abb. 5.2), wobei der auf dem zweitgenannten System eingesetzte Profillaserscanner auch Gegenstand von Publikation C ist. Beide Multisensorsysteme beinhalten sowohl kommerzielle als auch selbst entwickelte Systemkomponenten. Bei der Entwicklung der Multisensorsysteme hat der Autor der vorliegenden Dissertation maßgeblich mitgewirkt.

Im Folgenden werden die relevanten Publikationen A – E einzeln zusammengefasst. Die Hauptaspekte der Publikationen werden in Kapitel 5 noch einmal gesondert herausgearbeitet.

Publikation A (peer-reviewed)

Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2015). Development, Calibration and Evaluation of a Portable and Direct Georeferenced Laser Scanning System for Kinematic 3D Mapping. *Journal of Applied Geodesy*, 9(4), 227–243, doi.org/10.1515/jag–2015–0011

In dieser Publikation wird die Entwicklung, Kalibrierung und Evaluierung eines leichten, tragbaren low-cost Laserscanningsystems beschrieben. Das System nutzt zur Objektraumerfassung einen Hokuyo UTM-30LX-EW Profillaserscanner und zur Trajektorienbestimmung eine Georeferenzierungseinheit, die im Zuge einer anderen Dissertation an der Universität Bonn entwickelt wurde [Eling, 2016]. Die Georeferenzierungseinheit nutzt einen Magnetfeldsensor, eine MEMS-IMU sowie GPS in Form von RTK-Positionen und einer onboard-GPS-Basislinie, um die Position und Orientierung der Plattform in einem loosely-coupled Kalman-Filter mit einer Genauigkeit von $< 0{,}05$ m bzw. $< 0{,}2°$ zu schätzen. Die Hauptaspekte der vorliegenden Publikation sind die Integration des Profillaserscanners in das System sowie die Evaluierung des Systems.

Zur Bestimmung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen dem Profillaserscanner und der Georeferenzierungseinheit wird ein Kalibrieransatz verwendet, der sich methodisch an Strübing & Neumann [2013] orientiert. Dabei werden unterschiedlich orientierte Referenzebenen zunächst mithilfe eines TLS georeferenziert eingemessen und danach mit dem kinematischen Laserscanningsystem abgescannt. Die Scanpunkte des TLS und des kinematischen Laserscanningsystems werden über Ebenenparameter miteinander verknüpft. Daraus resultieren Bedingungsgleichungen, die in einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten zur simultanen Schätzung der Ebenenparameter und Kalibrierparameter verwendet werden können. Im vorliegenden Fall wird ein temporäres Kalibrierfeld bestehend aus acht Holzebenen verwendet. Die Erfassung der Ebenen mit dem kinematischen Laserscanningsystem erfolgt statisch von zehn Standpunkten aus. Von jedem Standpunkt werden mehrere Ebenen unter Variation von Position und Orientierung der Plattform abgescannt. Die geschätzte Genauigkeit der Kalibrierung liegt bei Standardabweichungen von rund 4 mm für die Hebelarmkomponenten und $0{,}05°$ bis $0{,}12°$ für die Boresight-Winkel, was beides unterhalb der Trajektoriengenauigkeit liegt. Als weiteres Qualitätsmaß für die Kalibrierung werden Parameterkorrelationen von < 15 % bestimmt, die eine gute Trennbarkeit der Parameter attestieren. Zudem erfolgt eine Varianzkomponentenschätzung für die Beobachtungen des kinematischen Laserscanningsystems, die später zur Evaluierung eingesetzt werden.

Bei der Evaluierung des Systems wird der Hokuyo UTM-30LX-EW zunächst gesondert evaluiert. Es werden verschiedene systematische Effekte, z. B. eine Drift der Distanzmessung, festgestellt. Durch Wiederholungsmessungen auf verschiedenfarbige, ebene Oberflächen wird die Präzision der Distanzmessung im Bereich bis 30 m mit einer Standardabweichung von 5 mm bis 15 mm bestimmt. Die hierbei eingesetzte Methodik zur Bestimmung der Präzision der Distanzmessung wird in Publikation C detailliert beschrieben. Basierend auf den Erkenntnissen aus Publikation C wird unter Nutzung der Messungen aus Publikation A in Abschnitt 5.3 dieser Dissertation ein intensitätsbasiertes stochastisches Modell für den Hokuyo UTM-30LX-EW abgeleitet. Dies ist in Ergänzung zu den Inhalten der fünf relevanten Publikationen zu sehen. Schlussendlich wird das Gesamtsystem in zwei verschiedenen Testumgebungen evaluiert. Die Evaluierung basiert auf Punktwolkenvergleichen zu einer georeferenzierten TLS-Referenzpunktwolke in der Software CloudCompare und liefert RMS-Werte von < 85 mm. Diese Werte stimmen gut mit Werten überein, die aus einer Varianzfortpflanzung

der Georeferenzierungsgleichung auf Basis der geschätzten Genauigkeit der Kalibrierung und den Varianzkomponenten für die Beobachtungen des Systems resultieren.

Der Beitrag der vorliegenden Publikation besteht darin, dass der Kalibrieransatz von Strübing & Neumann [2013] vom Indoor- auf den Outdoor-Bereich übertragen wird, sodass auch GNSS-gestützte Systeme kalibriert werden können. Zudem führt die vorliegende Publikation die mathematischen und methodischen Grundlagen des ebenenbasierten Kalibrieransatzes ein, welcher in den Publikationen B und E weiterentwickelt wird. Auf die Wichtigkeit der Ebenenanordnung für die Kalibrierung wird in dieser Publikation bereits hingewiesen, allerdings erfolgt noch keine strikte Konfigurationsanalyse auf Grundlage der geodätischen Qualitätstheorie (vgl. Abschnitt 3.4). Zudem beschränkt sich die Kalibrierung noch auf den Hebelarm und die Boresight-Winkel und erfolgt statisch in einem temporären Kalibrierfeld. Alle genannten Punkte werden in den Publikationen B und E weiterentwickelt (vgl. Abb. 4.1). Hinsichtlich der Evaluierung liefert diese Publikation erste Ansätze zur Bestimmung eines stochastischen Modells für die Distanzmessung von Profillaserscannern, die in Publikation C vervollständigt werden. Die Resultate dieser Publikation zeigen ebenfalls, dass die flächenhafte Evaluierung auf Basis von TLS-Referenzpunktwolken großes Potential bietet. Allerdings muss man hierbei beachten, dass Punktwolkenvergleiche nicht immer sensitiv gegenüber allen Abweichungsquellen sind und richtig interpretiert werden müssen. Dies wird insbesondere in Publikation E erneut aufgegriffen.

Publikation B (peer-reviewed)

Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2017). Analysis of different reference plane setups for the calibration of a mobile laser scanning system. In *Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 17 – Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich* (pp. 131–145). Wichmann Verlag, Berlin, hdl.handle.net/20.500.11811/1352

In dieser Publikation wird der ebenenbasierte Kalibrieransatz aus Publikation A aufgegriffen und modifiziert. Die wesentlichen Modifikationen bestehen darin, dass das Kalibriermodell um die Nullpunktabweichung des Profillaserscanners erweitert wird und somit neben dem Hebelarm und den Boresight-Winkeln auch Teile der inneren Kalibrierung des Profillaserscanners umfasst. Zudem werden die Ebenenanordnung sowie die Art und Weise der Aufnahme der Ebenen mit dem kinematischen Laserscanningsystem einer Konfigurationsanalyse unterzogen. Diese Konfigurationsanalyse interpretiert den ebenenbasierten Kalibrieransatz als geodätisches Netz und analysiert die Parameterschätzung unter Nutzung geodätischer Qualitätsmaße (vgl. Abschnitt 3.4). Im Kontext der Konfigurationsanalyse werden sowohl die Genauigkeit (Varianzen und Korrelationen der Kalibrierparameter) als auch die innere Zuverlässigkeit (Redundanzanteile, kleinste aufdeckbare grobe Fehler) und die äußere Zuverlässigkeit (Einflussvektoren auf die Kalibrierparameter) untersucht. Die Kalibrierprozedur für das kinematische Laserscanningsystem erfolgt weiterhin statisch. Auch das Kalibrierfeld besteht nach wie vor aus einem temporären Aufbau mit acht Holzebenen, die jedoch jetzt definiert angeordnet sind.

Im Zuge der Konfigurationsanalyse werden zwei unterschiedliche Ebenenanordnungen F_1 und F_2 simuliert, die jeweils auf zwei verschiedene Weisen mit dem kinematischen Laserscanningsystem aufgenommen werden. Im Fall a werden die Ebenen mit einer konstanten azimutalen Orientierung des Systems erfasst, während im Fall b die azimutale Orientierung des Systems um $\pm$ 180° variiert wird. Im Fall b resultiert daraus eine Art Zwei-Lagen-Messung der Ebenen. Es ergeben sich insgesamt vier Fälle (F_{1a}, F_{1b}, F_{2a} und F_{2b}), die auf Basis der geodätischen Qualitätsmaße miteinander verglichen werden. Das stochastische Modell orientiert sich an Herstellerangaben und Erfahrungswerten und komplettiert die Konfiguration der Ausgleichung. Die Konfigurationsanalyse erfolgt unter Nutzung einer selbst entwickelten Simulationsumgebung. Die Ergebnisse zeigen, dass der Hebelarm $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ sowie die Boresight-Winkel α und γ ($\approx$ Roll- bzw. Yaw-Achse) in allen Fällen gleich genau und korrelationsfrei bestimmt werden können. Beim Boresight-Winkel β ($\approx$ Pitch-Achse) und der Nullpunktabweichung d_0 gibt es hingegen Unterschiede. Wird die Ebenenanordnung unter konstanter azimutaler Orientierung erfasst (F_{1a}, F_{2a}), erhalten beide Parameter größere Varianzen und eine Korrelation von etwa 30 %. Diese Korrelation verschwindet, wenn die azimutale Orientierung um $\pm$ 180° variiert wird (F_{1b}, F_{2b}). Zudem verkleinert sich die Varianz beider Parameter. Unabhängig von der Orientierung des Systems werden für die Ebenenanordnung F_1 kleinere Varianzen erreicht. Für die Zuverlässigkeit zeigt sich, dass diese ebenfalls von der Ebenenanordnung abhängt. Insbesondere die Kontrollierbarkeit des

Pitch-Winkels θ ist problematisch und für die Ebenenanordnung F_1 deutlich besser. Nicht detektierte grobe Fehler im Pitch-Winkel θ wirken sich insbesondere auf den Boresight-Winkel β aus (vgl. Publikation E). Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Ebenenanordnung als auch die Art der Erfassung mit dem kinematischen Laserscanningsystem einen Einfluss auf die Qualität der Kalibrierparameter haben.

In der Konfigurationsanalyse wird Fall F_{1b} als bester Fall identifiziert und zur Kalibrierung eines neu aufgebauten Mobile Mapping Systems realisiert. Das Mobile Mapping System setzt zur Objektraumerfassung einen Z+F Profiler 9012A und zur Trajektorienbestimmung ein Inertialmesssystem iMAR iNAV-FJI-LSURV mit faseroptischen Gyroskopen, Servo-Akzelerometern und RTK-GNSS ein. Laut Hersteller erreicht das System Positionsgenauigkeiten im mm bis cm-Bereich und Genauigkeiten für die Orientierung von 0,002° bis 0,025°. Die Kalibrierung liefert unkorrelierte Kalibrierparameter mit geschätzten Standardabweichungen von 1,9 mm für die Hebelarmkomponenten und 0,0019° für die Boresight-Winkel. Auch die Nullpunktabweichung wird mit einer Genauigkeit von 0,01 mm geschätzt. Allerdings ergeben sich diese hohen Genauigkeiten auf Grundlage von unkorrelierten Beobachtungen mit rein zufälligen Abweichungen. Während grobe Fehler aufgrund hoher Redundanzanteile $\geq 0{,}7$ für alle Beobachtungen gut detektierbar sind, bleibt der Einfluss von systematischen Abweichungen und Korrelationen auf die Parameterschätzung in dieser Publikation noch offen. Es ist daher davon auszugehen, dass die geschätzten Parametergenauigkeiten zu optimistisch sind. Inhaltlich schließt sich an diese Fragestellung Publikation E an, in der der Einfluss von zufälligen und systematischen Abweichungen sowie von groben Fehlern gemeinsam analysiert wird und darüber hinaus eine empirische Feststellung der Genauigkeit durch mehrfache Wiederholung der Kalibrierung erfolgt.

Schlussendlich wird das Mobile Mapping System einer unabhängigen Evaluierung unterzogen. Dies erfolgt über einen Punktwolkenvergleich zwischen zwei kinematisch erfassten Punktwolken des Multisensorsystems. Dazu wird die Fassade des Poppelsdorfer Schlosses in Bonn zweimal mit entgegengesetzter Bewegungsrichtung des Systems aufgenommen. Hierbei wird ein RMS-Wert von rund 28 mm erreicht und die beiden Punktwolken zeigen eine gute Übereinstimmung. Allerdings gibt es auch lokale Bereiche mit stärkeren Abweichungen. Diese Abweichungen lassen sich mit Ungenauigkeiten in der Trajektorienbestimmung begründen. Insgesamt zeugt der Punktwolkenvergleich von einer guten Kalibrierung des Systems.

Publikation C (peer-reviewed)

Heinz, E., Mettenleiter, M., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2018c). Strategy for Determining the Stochastic Distance Characteristics of the 2D Laser Scanner Z+F Profiler 9012A with Special Focus on the Close Range. *Sensors*, 18(7), 2253, doi.org/10.3390/s18072253

In der vorliegenden Publikation wird die Präzision der Distanzmessung des Profillaserscanners Z+F Profiler 9012A untersucht, der in den Publikationen B, D und E als objektraumerfassender Sensor eines kinematischen Laserscanningsystems eingesetzt wird. In diesem Zusammenhang liefert die Publikation drei wesentliche Beiträge: (i) Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen für die Präzision der Distanzmessung von Profillaserscannern, (ii) Ableitung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen für den Z+F Profiler 9012A, (iii) Analyse des Distanzmessrauschens des Z+F Profiler 9012A im Nahbereich bis 20 m.

Wie Wujanz et al. [2017, 2018] zeigen, kann die Präzision σ_d der Distanzmessung bei Laserscannern mithilfe der Intensität I des reflektierten Laserlichts über den Zusammenhang $\sigma_d = a \cdot I^b + c$ beschrieben werden. Dieser Zusammenhang gilt für Rohintensitäten, die weder distanznormiert noch auf das Übertragungsverhalten der Optik angepasst sind. Die in Wujanz et al. [2017, 2018] entwickelten Methoden zur Bestimmung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen setzen jedoch einen 1D- bzw. 3D-Messmodus des Laserscanners voraus. Im Gegensatz dazu wird in dieser Publikation erstmals eine Methodik für Profillaserscanner vorgestellt, die viele praktische Vorteile bietet. So wird der Profillaserscanner im normalen Messmodus betrieben, es wird keine zusätzliche Ausrüstung benötigt und es werden keine Modellannahmen für die abgescannten Objektoberflächen getroffen. Somit ist die Methodik auch im normalen Messbetrieb einsetzbar. Die Methodik basiert darauf, dass Oberflächen im Profilmodus statisch über mehrere Sekunden abgescannt werden. Aus den sich überlappenden Scanprofilen werden die Distanzmessungen der einzelnen Winkelschritte des

Laserscanners extrahiert und ihre empirische Standardabweichung in Bezug zur mittleren Intensität gesetzt. Die Oberflächen sollten einigermaßen eben sein und es sollten keine Punkte mit zu schrägen Einfallswinkeln und zu großen Distanzen genutzt werden. Hierzu liefert die Publikation eine Abschätzformel. Eine besondere Kombination aus verschiedenen Distanzen, Einfallswinkeln und Materialeigenschaften wird nicht benötigt. Es ist lediglich darauf zu achten, dass die Messungen den Intensitätsbereich möglichst vollständig abdecken.

Die Methodik wird angewendet, um das intensitätsabhängige Distanzmessrauschen des Z+F Profiler 9012A zu analysieren. Dazu werden verschiedene Experimente im Indoor- und Outdoor-Bereich durchgeführt, bei denen verschiedene Oberflächen unter variierender Konfiguration (Distanz und Einfallswinkel) abgescannt werden, um den Intensitätsbereich des Laserscanners möglichst vollständig abzudecken. Diese Experimente werden für alle drei Scanraten des Laserscanners (254 kHz, 508 kHz und 1016 kHz) wiederholt, sodass für jede Scanrate ein eigenes stochastisches Modell vorliegt. Die Scanraten unterscheiden sich dahingehend, dass ausgehend von der größten Scanrate Punktmittelungen bei den niedrigeren Scanraten stattfinden, die statistisch gesehen zu einer Steigerung der Präzision führen. So erwartet man beim Übergang von 1016 kHz auf 508 kHz eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor $\sqrt{2} = 1{,}41$ und beim Übergang von 1016 kHz auf 254 kHz eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor $\sqrt{4} = 2$. Empirisch werden auf Grundlage der intensitätsbasierten stochastischen Modelle die Faktoren 1,41 und 1,81 abgeleitet, die mit der Theorie gut übereinstimmen. Der Faktor 1,81 erklärt sich dadurch, dass die Präzision bei der kleinsten Scanrate von 254 kHz durch die Diskretisierung der Distanzmessung begrenzt wird. Zudem bleibt der Einfluss von Korrelationen ungeklärt.

In den Grundlagen dieser Dissertation wurde auf die zunehmende Dämpfung der Signalintensität im Nahbereich eingegangen (vgl. Abb. 3.4), die durch Defokussierung und Verschattung der Laseroptik hervorgerufen wird und das Distanzmessrauschen erhöht. Dieser Effekt wird anhand des Z+F Profiler 9012A auf Basis der beschriebenen Experimente empirisch verifiziert, indem Präzision und Intensität als Funktion der Distanz im Bereich bis 20 m analysiert werden. Im Falle des Z+F Profiler 9012A zeigt sich, dass dieser aufgrund einer speziellen Hardware-Optimierung den Abfall der Präzision im Nahbereich teilweise kompensieren kann. Die zugehörige Nahbereichsoptimierung funktioniert bei Distanzen von 2 m am besten (vgl. Abb. 3.4). Für die vorliegende Dissertation hat dieser Umstand eine hohe Relevanz, weil viele Anwendungen im Bereich des kinematischen Laserscannings mit sehr kurzen Zielweiten < 5 m konfrontiert sind (z. B. Straßenzustandserfassung oder Lichtraumprofilmessung). Dies wird in Publikation D wieder aufgegriffen.

Die vorliegende Publikation trägt zu einem besseren Verständnis der Stochastik von Profillaserscannern und von kinematischen Laserscanningsystemen insgesamt bei.

Publikation D (peer-reviewed)

Heinz, E., Eling, C., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2020a). On the applicability of a scan-based mobile mapping system for monitoring the planarity and subsidence of road surfaces - Pilot study on the A44n motorway in Germany. *Journal of Applied Geodesy*, 14(1), 39–54, doi.org/10.1515/jag–2019–0016

In der vorliegenden Publikation wird die Eignung eines kinematischen Laserscanningsystems zur Überwachung von Höhenänderungen von Straßenoberflächen sowie zur Bestimmung von Zustandsparametern für die Ebenheit von Straßenoberflächen untersucht. Bezüglich der Zustandsparameter werden die Querneigung, die Spurrinnentiefe und die fiktive Wassertiefe betrachtet. Diese Publikation gliedert sich in den Gesamtkontext der Dissertation dahingehend ein, als dass es sich um die Evaluierung eines Systems im Rahmen einer Anwendung handelt. Bei dem untersuchten System handelt es sich um das Mobile Mapping System, welches auch in den Publikationen B und E eingesetzt wird. Das Untersuchungsgebiet ist ein 6 km langer Abschnitt der Autobahn A44n in Nordrhein-Westfalen, Deutschland.

In Rahmen der Publikation werden vier Forschungsfragen aufgeworfen und beantwortet:

1) Wie ist die Präzision und Richtigkeit der Höhenkomponente des Systems? Dies ist wichtig, um potentielle Höhenänderungen der Straßenoberfläche zwischen zwei Epochen zu bestimmen.

2) Wie genau können physikalische Höhen unter Nutzung eines Undulationsmodells aus den Punktwolken extrahiert werden? Dies ist für den Vergleich mit anderen Messverfahren wichtig (z. B. Nivellement).

3) Welche Höhenänderungen können unter Nutzung des Systems signifikant detektiert werden?

4) Wie genau lassen sich die Straßenzustandsparameter Querneigung, Spurrinnentiefe und fiktive Wassertiefe aus den Punktwolken des Systems extrahieren? In welchem Zustand ist die Straßenoberfläche?

Zur Evaluierung von Präzision und Richtigkeit der Höhenkomponente werden acht nivellierte Kontrollpunkte entlang der Autobahn A44n über Zielzeichen signalisiert und mit dem kinematischen Laserscanningsystem jeweils zweimal erfasst. Es ergeben sich somit insgesamt 16 Punktmessungen. Die aus den Punktwolken extrahierten Höhenwerte werden im Anschluss mit den Referenzwerten verglichen. Die Referenzhöhen liegen als Normalhöhen im DHHN16 (Deutsches Haupthöhennetz 2016) vor, während aus den Punktwolken ellipsoidische Höhen im GRS80 (Geodetic Reference System 1980) bestimmt werden. Die Verknüpfung der Höhen erfolgt über Quasigeoidundulationen aus dem GCG16-Modell (German Combined Quasigeoid 2016). Zusätzlich wird aus dem Vergleich von statischen GNSS Basislinien und Nivellements entlang der Autobahn eine lokale Neigungskorrektur für das GCG16-Modell bestimmt. Die Auswertung zeigt eine absolute Höhengenauigkeit von < 15 mm (RMS), die unter Nutzung der Neigungskorrektur auf < 10 mm (RMS) verbessert werden kann. Die aus den Doppelmessungen abgeleitete Präzision der Höhenbestimmung ist mit einer Standardabweichung von rund 5 mm sogar noch besser. Unabhängige Punktwolkenvergleiche zwischen mehrfach aufgenommenen Abschnitten der Straßenoberfläche bestätigen die hohe Präzision. Die schlechtere Richtigkeit der Höhenbestimmung wird auf Restabweichungen im GCG16-Modell, Fehler bei der Adaption der Zielzeichen an den Kontrollpunkten oder eventuelle Koordinatenveränderungen der Referenzpunkte nach Abschluss der vorangegangenen, nivellitischen Einmessung zurückgeführt. Auf Grundlage der Ergebnisse ist es möglich, Höhenänderungen der Straßenoberfläche im Bereich weniger Zentimeter signifikant nachzuweisen.

Die Bestimmung der Straßenzustandsparameter ergibt für die Querneigung eine Präzision von $\sigma < 0{,}07$ % ($\sigma < 0{,}04°$, σ = Standardabweichung). Eine Prüfung der Richtigkeit kann in Ermangelung von Referenzwerten nicht erfolgen. Allerdings sind die Ergebnisse in Hinblick auf die Vorschriften der FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.) für die Querneigung von Straßen auf deutschen Autobahnen durchweg plausibel. Signifikante Spurrinnentiefen bzw. fiktive Wassertiefen werden nicht festgestellt, sodass der Zustand der Straße insgesamt als sehr gut zu bewerten ist. Hinsichtlich der Spurrinnentiefe sowie der fiktiven Wassertiefe zeigen sich Unterschiede in den Ergebnissen in Abhängigkeit der Scanrate des verwendeten Profillaserscanners Z+F Profiler 9012A. Dies steht in direktem Zusammenhang mit den stochastischen Eigenschaften der Distanzmessung des Instruments, die in Publikation C detailliert thematisiert werden.

Publikation E (peer-reviewed)

Heinz, E., Holst, C., Kuhlmann, H., & Klingbeil, L. (2020b). Design and Evaluation of a Permanently Installed Plane-Based Calibration Field for Mobile Laser Scanning Systems. *Remote Sensing*, 12(3), 555, doi.org/10.3390/rs12030555

In dieser Publikation wird der ebenenbasierte Kalibrieransatz zur Bestimmung des Hebelarms, der Boresight-Winkel und der Nullpunktabweichung eines Laserscanners auf einem Multisensorsystem erneut aufgegriffen. Anders als in Publikation A und B erfolgt die Kalibrierung jedoch nicht mehr statisch, sondern kinematisch. Dadurch kann die Kalibrierung deutlich schneller durchgeführt werden und erfolgt außerdem im normalen Betriebsmodus der Systeme. Durch die kinematische Aufnahme der Ebenen gehen deutlich mehr Beobachtungen in die Ausgleichung ein, was die Sicherheit der Schätzung verbessert, aber auch den Berechnungsaufwand erhöht. Aus diesem Grund werden die Ebenenparameter nicht mehr simultan mit den Kalibrierparametern in einer großen Ausgleichung geschätzt, sondern vorab nur auf Basis der TLS-Beobachtungen abgeleitet. Im Zuge der eigentlichen Kalibrierung werden die Ebenenparameter dann als bekannt angenommen.

Die Idee der Konfigurationsanalyse für die Anordnung der Ebenen aus Publikation B wird erweitert. Neben zufälligen Abweichungen und groben Fehlern wird auch der Einfluss von systematischen Abweichungen auf das Ergebnis der Kalibrierung analysiert. Ferner erfolgt eine Analyse der Sensitivität der Ebenenanordnung hinsichtlich der Kalibrierparameter. In Bezug auf die Genauigkeit werden einzuhaltende Grenzwerte

für die Standardabweichungen der Kalibrierparameter über Varianzfortpflanzung der Georeferenzierungsgleichung (siehe Abschnitt 3.1) abgeleitet: $\sigma < 1$ mm bis 1,5 mm für den Hebelarm und $\sigma < 0{,}005°$ für die Boresight-Winkel. Die Konfigurationsanalyse wird eingesetzt, um eine Ebenenanordnung abzuleiten, die eine genaue, zuverlässige und sensitive Schätzung der Kalibrierparameter mit möglichst geringen Korrelationen ermöglicht. Simulationen zeigen, dass zufällige Abweichungen durch die hohe Redundanz der Ausgleichung ausreichend reduziert werden können. Aufgrund hoher Redundanzanteile bzw. kleiner Einflussvektoren haben grobe Fehler ebenfalls keinen nennenswerten Einfluss auf die Kalibrierung. Problematisch sind systematische Abweichungen in den Orientierungswinkeln der Plattform (Roll ϕ, Pitch θ und Yaw ψ) sowie der Höhe, da diese die Boresight-Winkel bzw. die vertikale Hebelarmkomponente Δz beeinträchtigen. Systematische Positionsabweichungen in der Lage können hingegen durch eine geschickte Messstrategie in Form einer Zwei-Lagen-Messung weitestgehend eliminiert werden. Hinsichtlich der Sensitivität zeigt sich, dass die Ebenenanordnung gegenüber allen Kalibrierparametern eine gute Sensitivität aufweist, außer für den Boresight-Winkel β. Dieser lässt sich demzufolge ungenauer bestimmen als die anderen beiden Boresight-Winkel. Die Grenzwerte für die geforderte Genauigkeit werden in der Simulation jedoch bei allen Kalibrierparametern eingehalten.

Die im Zuge der Konfigurationsanalyse abgeleitete Ebenenanordnung wird in Form eines permanent installierten Kalibrierfeldes im Outdoor-Bereich realisiert. Für die Ebenen werden Tiefbauelemente aus Sichtbeton genutzt, die sich durch eine hohe Planarität bei gleichzeitiger Robustheit und Kosteneffizienz auszeichnen. Die Kalibrierprozedur nimmt weniger als eine Minute in Anspruch, sodass die Kalibrierung häufig wiederholt werden kann. Neben der Konfigurationsanalyse erhöht dies zusätzlich die Zuverlässigkeit der Kalibrierung und ermöglicht zudem eine realistische, empirische Bestimmung der Genauigkeit der Kalibrierparameter. Das kinematische Laserscanningsystem aus Publikation B bzw. D wird insgesamt 98-mal mithilfe der Ebenenanordnung kalibriert. Dabei zeigt sich, dass die Genauigkeit einer Einzelrealisierung nicht ausreicht, um die geforderte Genauigkeiten von $\sigma < 1$ mm bis 1,5 mm für den Hebelarm und $\sigma < 0{,}005°$ für die Boresight-Winkel zu erreichen. Dies wird auf den Einfluss systematischer Abweichungen in der Trajektorienbestimmung zurückgeführt. Es wird daher empfohlen, 15 Kalibrierdurchläufe durchzuführen und dies nach einer Pause von 1 bis 3 Stunden zu wiederholen. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass systematische Abweichungen – hauptsächlich aufgrund der GNSS/IMU-Integration – so stark in Betrag und Richtung variieren, dass diese durch Mittelbildung ausreichend reduziert werden können. Auf diese Weise lassen sich die geforderten Genauigkeiten für die Kalibrierparameter auch in der Praxis erreichen.

Nach der Kalibrierung wird das kinematische Laserscanningsystem unabhängig evaluiert. Hierzu wird eine Evaluierungseinrichtung genutzt, die im Rahmen der vorliegenden Dissertation aufgebaut wurde. Die Evaluierungseinrichtung umfasst ein großes Netzwerk an Kontrollpunkten (6 Pfeiler und 15 Gebäudepunkte), welche mit einer Standardabweichung von $\sigma < 1$ mm in Lage und Höhe eingemessen sind. Ferner liegen für zahlreiche Gebäude TLS-Referenzpunktwolken vor, die mithilfe der Kontrollpunkte hochgenau georeferenziert wurden. In der Evaluierungseinrichtung werden mehreren Testfahrten mit dem System durchgeführt. Anhand von insgesamt 148 gescannten Kontrollpunkten wird die Genauigkeit des Systems mit einem RMS zwischen 7 mm und 9 mm für Lage und Höhe bestimmt. Diese Genauigkeit wird von Punktwolkenvergleichen zur TLS-Referenz bestätigt. Die TLS-Referenzpunktwolken werden darüber hinaus dazu eingesetzt, einzelne Komponenten des Systems (z. B. die Boresight-Kalibrierung) näher zu analysieren. Sowohl das ebenenbasierte Kalibrierfeld als auch die Evaluierungseinrichtung sind dauerhaft installiert und können zukünftig auch für andere kinematische Laserscanningsysteme eingesetzt werden.

5. Hauptaspekte

In Kapitel 4 wurden die für die vorliegende Dissertation relevanten Publikationen inhaltlich zusammengefasst. Im Zuge einer Gesamtbetrachtung sollen im Folgenden noch einmal die wichtigsten Aspekte der Publikationen herausgearbeitet werden. Dies umfasst auch die inhaltliche Verknüpfung der Publikationen. An ausgewählten Stellen werden ergänzende Untersuchungen, die nicht Teil der relevanten Publikationen sind, hinzugefügt.

Im Rahmen dieser Dissertation wurden zwei unterschiedliche Multisensorsysteme für kinematisches Laserscanning entwickelt, deren Aufbau in Abschnitt 5.1 kurz erläutert wird. Darüber hinaus wurde eine Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn aufgebaut. Die wesentlichen Bestandteile dieser Einrichtung werden in Abschnitt 5.2 beschrieben. Die Multisensorsysteme sowie die Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung sind notwendige Voraussetzungen zur Adressierung der in Abschnitt 1.2 formulierten Zielsetzungen dieser Dissertation und stellen neben den methodischen Beiträgen zur Kalibrierung und Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme einen signifikanten Teil der wissenschaftlichen Leistung dar. Die primären Fragestellungen werden anschließend in den Abschnitten 5.3, 5.4 und 5.5 diskutiert.

5.1 Aufbau verschiedener Multisensorsysteme für kinematisches Laserscanning

Die Verfügbarkeit kinematischer Laserscanningsysteme ist eine wesentliche Voraussetzung zur Adressierung der primären Fragestellungen dieser Dissertation. Am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn sind daher in den vergangenen Jahren zwei unterschiedliche Multisensorsysteme für kinematisches Laserscanning aufgebaut worden, an deren Entwicklung der Autor dieser Dissertation maßgeblich beteiligt war. Bei diesen Systemen handelt es sich zum einen um ein leichtes, tragbares low-cost Laserscanningsystem (Abschnitt 5.1.1; Publikation A) und zum anderen um ein Mobile Mapping System mit sehr hochwertiger Sensorik, das auf einem Trolley oder einem Fahrzeug adaptiert werden kann (Abschnitt 5.1.2; Publikationen B, D und E).

5.1.1 Leichtes, tragbares low-cost Laserscanningsystem

Das leichte, tragbare low-cost Laserscanningsystem ist in Abb. 5.1 abgebildet. Zur Objektraumerfassung nutzt das System einen auf dem Laufzeitverfahren basierenden Profillaserscanner Hokuyo UTM-30LX-EW [Hokuyo Automatic Co., Ltd., 2020]. Der Hokuyo UTM-30LX-EW scannt Punkte mit einer Winkelauflösung von 0,25° in einem Sichtfeld von 270° und einem vom Hersteller garantierten Distanzbereich von 0,1 m bis 30 m. Der maximale Distanzbereich wird mit 60 m angegeben. Die Auflösung der Distanzmessung beträgt 1 mm. Die nicht näher spezifizierte Genauigkeit ist mit ± 30 mm bis 50 mm angegeben. Der Laserscanner hat eine Profilrate von 40 rps (rotations per second) und eine Scanrate von rund 43 kHz. Durch seine geringe Größe (62 mm × 62 mm × 87,5 mm) und sein geringes Gewicht (210 g, ohne Kabel) ist der Sensor für den Einsatz auf einem leichten, tragbaren Laserscanningsystem geeignet. Der Hokuyo UTM-30LX-EW ist dem low-cost Segment zuzuordnen und wird für vielfältige Anwendungen im Bereich Robotik [Martínez et al., 2015], Indoor-Mapping [Maboudi et al., 2018] oder für UAVs [Droeschel et al., 2014] eingesetzt.

Die Trajektorienschätzung des Systems erfolgt durch eine GNSS/IMU-Einheit, die an der Universität Bonn im Rahmen des DFG-Projektes „Mapping on Demand“ (Deutsche Forschungsgemeinschaft, FOR 1505) entwickelt wurde [Eling, 2016]. Die GNSS/IMU-Einheit wurde ursprünglich zur Trajektorienschätzung eines UAVs entwickelt und im Rahmen dieser Dissertation auf das tragbare Laserscanningsystem übertragen. Genau wie beim Laserscanner sind die geringe Größe (110 mm × 102 mm × 45 mm) und das geringe Gewicht (240 g, ohne GPS-Antennen) begünstigende Faktoren für den Einsatz auf einem tragbaren System.

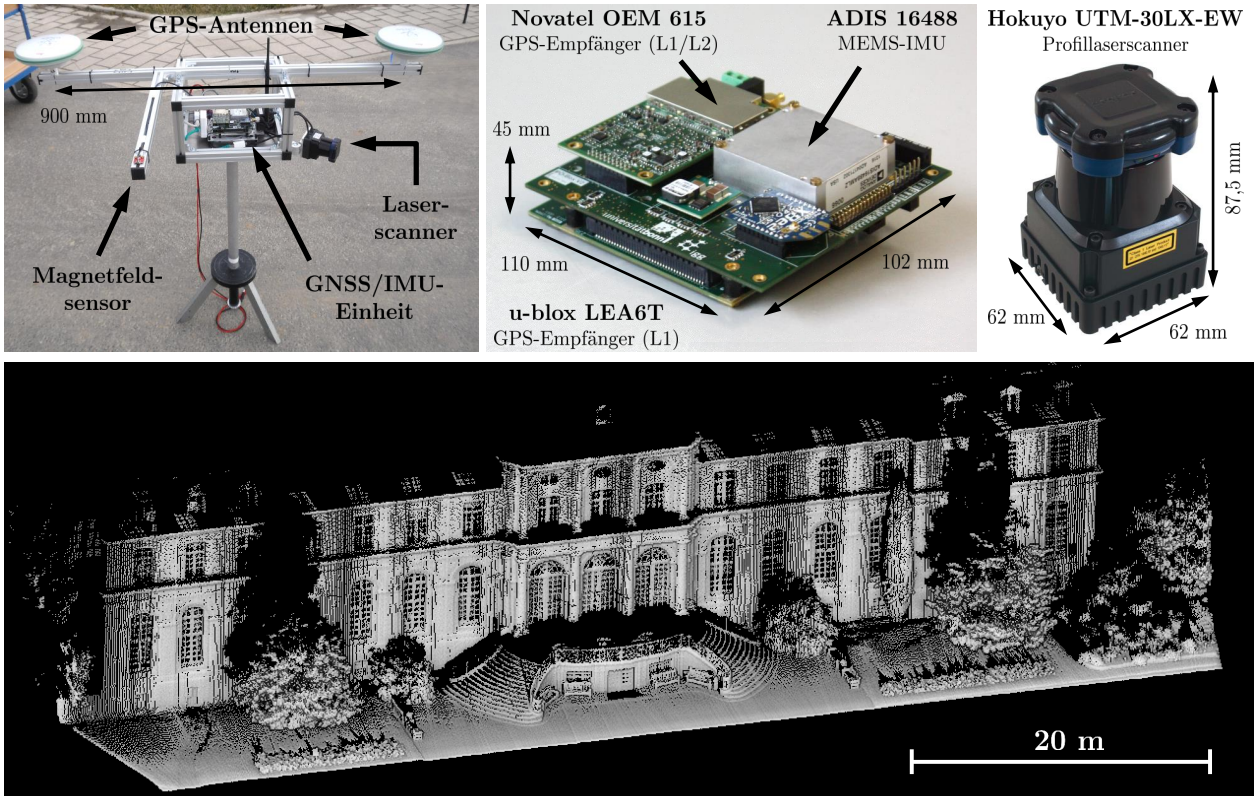


Abbildung 5.1: Oben: Tragbares low-cost Laserscanningsystem bestehend aus einer GNSS/IMU-Einheit [Eling, 2016] und einem Profillaserscanner Hokuyo UTM-30LX-EW [Hokuyo Automatic Co., Ltd., 2020]. **Unten**: Punktwolke des Poppelsdorfer Schlosses in Bonn (Abbildungen aus Heinz et al. [2015], modifiziert).

Die GNSS/IMU-Einheit umfasst einen geodätischen GPS-L1/L2-Empfänger (Novatel OEM 615) sowie einen zusätzlichen low-cost GPS-L1-Empfänger (u-blox LEA6T), die jeweils mit einer GPS-Antenne (Leica AS10) verbunden sind. Die beiden Antennen bilden eine etwa 90 cm lange Basislinie auf dem System, die im Folgenden als on-board Basislinie bezeichnet wird. Ergänzend beinhaltet das System eine tactical-grade MEMS-IMU (Analog Devices ADIS 16488) mit drei Akzelerometern, drei Gyroskopen, einem Magnetfeldsensor und einem Barometer. Da der Magnetfeldsensor der MEMS-IMU stark von magnetischen Störeinflüssen beeinträchtigt wird, beinhaltet das System einen zweiten Magnetfeldsensor (Honeywell HMC 5883L), der zur Minimierung der Störeinflüsse auf einem Ausleger montiert ist.

Die Positions- und Orientierungsbestimmung des Systems erfolgt mithilfe einer institutseigenen Auswertesoftware [Eling, 2016]. Bei dem in dieser Dissertation verwendeten Setup (siehe Publikation A) erfolgt auf Basis der Beobachtungen des GPS-L1/L2-Empfängers zunächst eine RTK-Positionsbestimmung mit einer Auflösung von 10 Hz. Dazu besteht eine Funkverbindung zu einer GPS-Referenzstation. Parallel werden mithilfe der GPS-Beobachtungen des Systems (nur L1-Frequenz) die Basislinienparameter der on-board Basislinie unter Zuhilfenahme der IMU und des Magnetfeldsensors geschätzt. Die on-board Basislinie dient später zur Bestimmung des Kurswinkels (GPS-Kompass). Die finale Positions- und Orientierungsschätzung erfolgt dann in einem loosely-coupled Kalman-Filter durch Fusion der RTK-Positionen und der on-board Basislinienparameter mit den Beobachtungen der IMU und des Magnetfeldsensors. Das Ergebnis ist eine Positions- und Orientierungsschätzung mit einer Auflösung von 100 Hz und einer Genauigkeit von $< 0{,}05$ m bzw. $< 0{,}5°$ bis $1°$. Die zeitliche Synchronisierung der Sensoren auf dem System erfolgt hardware-basiert mithilfe von Triggerimpulsen (PPS: Pulse Per Second).

Abb. 5.1 zeigt eine mit dem System aufgenommene Punktwolke des Poppelsdorfer Schlosses in Bonn. Dazu wurde das System an der Gebäudefassade vorbeibewegt. Die aufgenommenen Scanprofile des Laserscanners wurden anschließend unter Nutzung der Systemkalibrierung und der geschätzten Trajektorienparameter der

GNSS/IMU-Einheit georeferenziert. Das tragbare System zeichnet sich aufgrund von Größe und Gewicht durch eine hohe Flexibilität aus und ist zur Erfassung der Fassade in besonderer Weise geeignet, da dieser Bereich nur für Fußgänger zugänglich ist. Das gesamte Sensorgewicht beträgt $< 1{,}5$ kg, das Gesamtgewicht mit Metallgestell ist < 9 kg. Dem ist entgegenzuhalten, dass das System nur eine limitierte Genauigkeit und Auflösung für die Punktwolke erreicht. Auch die erfassbare Gebietsgröße ist beschränkt.

5.1.2 Fahrzeuggetragenes Mobile Mapping System

Als zweites Multisensorsystem für kinematisches Laserscanning wurde ein fahrzeuggetragenes Mobile Mapping System aufgebaut, das sich auch auf einem Trolley oder einem Fahrzeug adaptieren lässt (Abb. 5.2). Zur Objektraumerfassung wird ein Profillaserscanner Z+F Profiler 9012A der Firma Zoller & Fröhlich GmbH genutzt [Zoller & Fröhlich GmbH, 2020]. Dieser Sensor arbeitet nach dem Phasenvergleichsverfahren, hat ein Sichtfeld von 360° und erfasst einen Distanzbereich von 0,3 m bis 119 m. Die Punktauflösung im Scanprofil (5120, 10240 oder 20480 Punkte) sowie die Profilrate (50 rps, 100 rps oder 200 rps) sind nutzerseitig wählbar. Durch die Kombination von Profilauflösung und Profilrate ergeben sich Scanraten von 254 kHz, 508 kHz bzw. 1016 kHz. Die Genauigkeit der Winkelmessung wird mit 0,02° RMS (Root Mean Square Error) angegeben, die Distanzmessgenauigkeit schwankt je nach Messkonfiguration, Objekteigenschaften und Scanrate und kann allgemein mit einer Standardabweichung im unteren mm-Bereich beziffert werden. Eine besondere Eigenschaft des Laserscanners besteht in einer Optimierung der Laseroptik, die das Distanzmessrauschen im Nahbereich zwischen 1 m und 5 m verringert. In diesem Bereich nimmt das Distanzmessrauschen aufgrund von Defokussierungs- und Abschattungseffekten in der Laseroptik ab. Die Distanzpräzision des Z+F Profiler 9012A – insbesondere für den Nahbereich – wird in Abschnitt 5.3 im Detail behandelt.

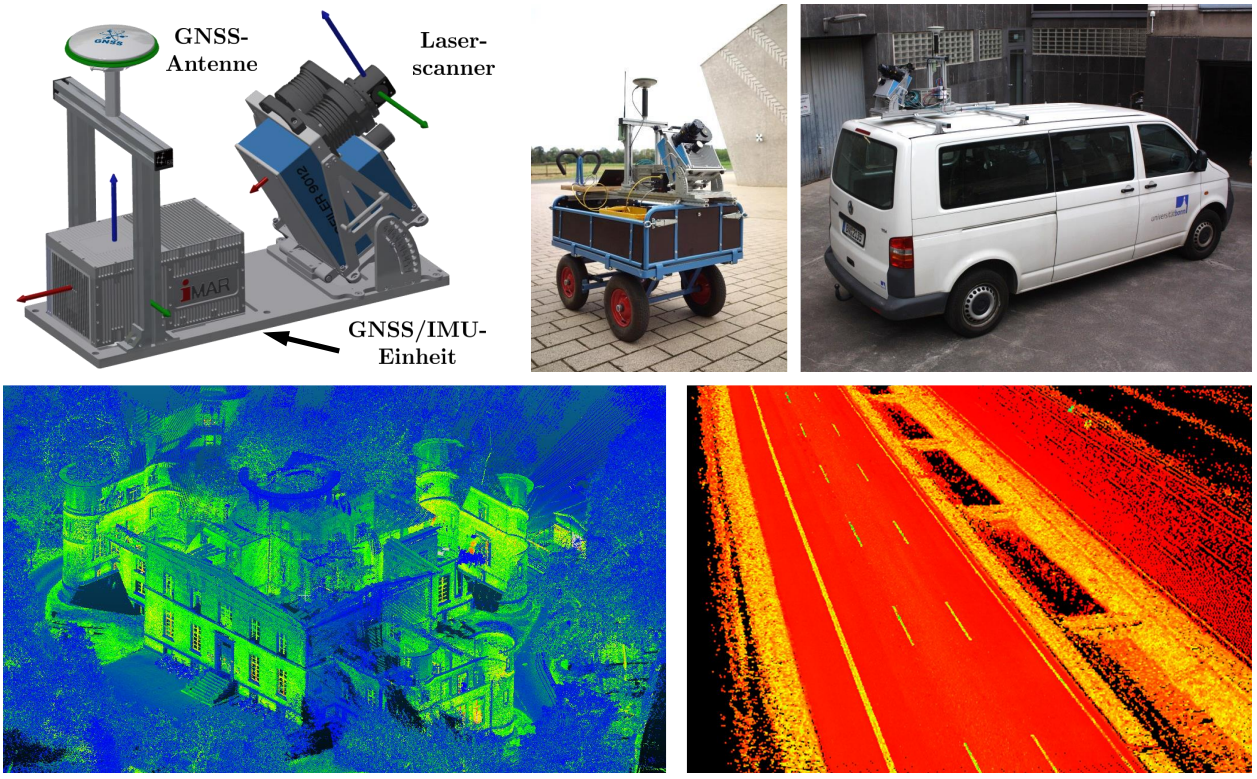


Abbildung 5.2: Oben: Mobile Mapping System mit einer GNSS/IMU-Einheit iMAR iNAV-FJI-LSURV [IMAR Navigation GmbH, 2016] und einem Profillaserscanner Z+F Profiler 9012A [Zoller & Fröhlich GmbH, 2020]. Das System lässt sich auf einem Trolley oder einem Fahrzeug adaptieren. **Unten**: Punktwolken der alten Sternwarte in Bonn sowie der Autobahn A44n nahe Mönchengladbach (Abbildungen aus Heinz et al. [2020a,b], modifiziert).

Zur Positions- und Orientierungsbestimmung der Plattform dient ein navigation-grade Inertialmesssystem iNAV-FJI-LSURV der Firma iMAR Navigation GmbH [IMAR Navigation GmbH, 2016]. Das Inertialmesssystem umfasst faseroptische Gyroskope und Servo-Akzelerometer, die Drehraten und Beschleunigungen mit einer Datenrate von bis 1500 Hz liefern. Darüber hinaus ist ein Multi-Frequenz/Multi-GNSS-Empfänger NovAtel OEM628 verbaut. In Verbindung mit einer GNSS-Referenzstation können RTK-Positionen mit einer Genauigkeit von wenigen cm bestimmt werden. Die Genauigkeit der Orientierung wird vom Hersteller mit $< 0{,}002°$ bis $0{,}025°$ spezifiziert (in Abhängigkeit der GNSS-Qualität). Die Zeitsynchronisierung der Sensoren erfolgt hardware-basiert mithilfe von PPS-Impulsen.

Die Trajektorienschätzung des Mobile Mapping Systems erfolgt in den Publikationen B, D und E auf unterschiedliche Weise. In den Publikationen B und D wird eine institutseigene Kalman-Filter-Toolbox verwendet, die mittels Strapdown-Integration der IMU-Beobachtungen zunächst eine Prädiktion durchführt. Die Prädiktion wird dann im Update-Schritt mit RTK-Positionsbeobachtungen fusioniert [Eling, 2016]. In Publikation E wird aufgrund der fortgeschrittenen Filter-Algorithmen auf die Software Inertial Explorer Version 8.80 zurückgegriffen [NovAtel Inc, 2019]. Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, wird die Schätzung der Trajektorie in der vorliegenden Dissertation nicht im Detail betrachtet, sondern als Black-Box Komponente genutzt.

Abb. 5.2 zeigt Punktwolken, die mit dem Mobile Mapping System aufgenommen wurden. Die Anwendungen des Systems sind vielfältig. So wurde das System zur Straßenzustandserfassung an der Autobahn A44n nahe Mönchengladbach eingesetzt (siehe Publikation D). In einer anderen Messkampagne erfolgte eine Erfassung von Teilen der Stadt Bonn. Diese Daten wurden im Rahmen studentischer Projekte ebenfalls zur Straßenzustandserfassung, aber auch zur Bestimmung von Lichtraumprofilen oder für die Kartierung von Objekten im Straßenraum – z. B. Bordsteinkanten, Straßenachsen oder Bäumen – eingesetzt.

In den Abschnitten 5.3, 5.4 und 5.5 werden Ergebnisse der Kalibrierung und Evaluierung beider Systeme (tragbares low-cost Laserscanningsystem und Mobile Mapping System) diskutiert. Dies geschieht teilweise unter Nutzung der Kalibrier- und Evaluierungseinrichtung für kinematische Laserscanningsysteme, die im folgenden Abschnitt 5.2 beschrieben wird.

5.2 Aufbau einer Kalibrier- und Evaluierungseinrichtung für kinematische Laserscanningsysteme

Im Rahmen dieser Dissertation ist neben den beiden Multisensorsystemen (Abschnitt 5.1) eine Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn aufgebaut worden, die in Publikation E vorgestellt und genutzt wird. Die operationellen Komponenten der Einrichtung sind ein Referenzfestpunktfeld mit Kontrollpunkten (Abschnitt 5.2.1), TLS-Referenzpunktwolken verschiedener Gebäude (Abschnitt 5.2.2) sowie ein ebenenbasiertes Kalibrierfeld zur Bestimmung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit (Abschnitt 5.2.3). Im Ausblick dieser Dissertation (Abschnitt 6.1) wird zudem eine schienengebundene Referenztrajektorie beschrieben, die für zukünftige Forschungsarbeiten – z. B. zur Evaluierung der Trajektorienschätzung – eingesetzt werden soll. Die Bedeutung der aufgebauten Einrichtung besteht auch darin, dass vergleichbare Einrichtungen nur in eingeschränktem Maße existieren (siehe z. B. Barber et al. [2008]; Kaartinen et al. [2012]; Hofmann [2017] oder Stenz et al. [2017]).

5.2.1 Referenzfestpunktfeld

Das Referenzfestpunktfeld bildet die Grundlage der Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung kinematischer Multisensorsysteme, da es einen genauen, konsistenten und schnell zugänglichen Raumbezug realisiert. Abb. 5.3 zeigt das Referenzfestpunktfeld, das sich am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn über eine Fläche von ca. 1,5 km^2 erstreckt. Die GNSS-Bedingungen variieren von nahezu freiem Horizont bis hin zu stark abgeschatteten Bereichen. Das Referenzfestpunktfeld besteht aus insgesamt 6 Pfeilern, 15 Gebäudepunkten und 16 Bodenpunkten. Von primärem Interesse sind die Pfeiler und die Gebäudepunkte. Diese sind

so konstruiert, dass sich Zielzeichen für Laserscanning oder Photogrammetrie daran befestigen lassen. Konkret werden die an der Universität Bonn entwickelten BOTA8-Targets (Bonn Target 8) verwendet [Janßen et al., 2019], die ein sternförmiges, 30 cm × 30 cm großes Schwarz-Weiß-Muster aufweisen (siehe Abb. 5.3, rechts). Die BOTA8-Targets wurden zur Registrierung von TLS-Scans entwickelt, lassen sich jedoch auch im Bereich des kinematischen Laserscannings – insbesondere zur punktbasierten Evaluierung – einsetzen.

Die Koordinaten der Festpunkte wurden in einer geodätischen Netzmessung mithilfe von Tachymetrie, Nivellement und statischen GNSS-Messungen sowohl in der Lage als auch in der Höhe hochgenau bestimmt. Das Datum des Festpunktfeldes wurde an die Bezugssysteme der deutschen Landesvermessung angeschlossen, d. h. ERTS89/UTM32 (European Terrestrial Reference System 1989, Universale Transversale Mercator Projektion Zone 32) für die Lage und DHHN16 (Deutsches Haupthöhennetz 2016) für physikalische Normalhöhen. Ergänzend hierzu wurden die ellipsoidischen Höhen aller Punkte bezogen auf das GRS80-Ellipsoid (Geodetic Reference System 1980) bestimmt. Die Verbindung zwischen physikalischen und ellipsoidischen Höhen wurde durch Nutzung des Quasigeoidmodells GCG16 (German Combined Quasi Geoid 2016) hergestellt [Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2017]. Das Referenzfestpunktfeld wurde zweimal gemessen (Juni 2017 und Juli 2018). Im Zuge einer geodätischen Deformationsanalyse in Form eines Zwei-Epochen-Vergleichs wurde das Festpunktfeld auf Stabilität geprüft [Heunecke et al., 2013]. Die Schätzung der finalen Punktkoordinaten erfolgte durch eine kombinierte Ausgleichung beider Messepochen mit geschätzten Standardabweichungen für die Punktkoordinaten von $\sigma < 0{,}7$ mm je Koordinatenrichtung.

Die Funktionen der Festpunkte sind: Punktbasierte Evaluierung von kinematischen Multisensorsystemen, Georeferenzierung von TLS-Punktwolken als Referenz für die flächenhafte Evaluierung von kinematischen Multisensorsystemen (Abschnitt 5.2.2), Grundlage zur Einmessung des ebenenbasierten Kalibrierfeldes (Abschnitt 5.2.3) oder Aufbau einer eigenen GNSS-Referenzstation auf den Pfeilern als Alternative zu SAPOS (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung) [Riecken & Kurtenbach, 2017].

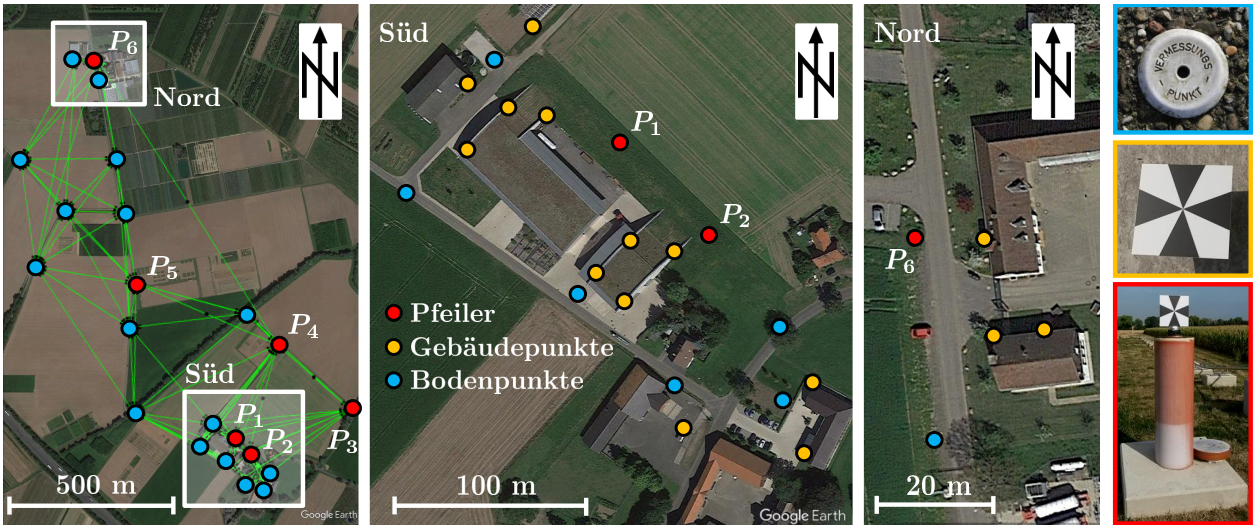


Abbildung 5.3: Referenzfestpunktfeld zur punkthaften Evaluierung von kinematischen Multisensorsystemen (6 Pfeiler (rot), 15 Gebäudepunkte (orange) und 16 Bodenpunkte (blau)). Die Kontrollpunkte können mit speziellen BOTA8-Targets signalisiert werden (Quelle der Luftbilder: Google Earth; Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert).

5.2.2 TLS-Referenzpunktwolken

Neben der punktbasierten Evaluierung kinematischer Multisensorsysteme auf Basis der Kontrollpunkte des Referenzfestpunktfeldes soll in der Einrichtung auch eine flächenhafte Evaluierung auf Grundlage von TLS-Referenzpunktwolken ermöglicht werden. Dazu wurden mehrere Gebäudekomplexe mittels TLS erfasst und über das Referenzfestpunktfeld hochgenau georeferenziert (Abb. 5.4). Die Messungen erfolgten mit einer Leica ScanStation P20 in zwei Lagen, um systematische Abweichungen des TLS soweit wie möglich zu reduzieren [Holst et al., 2018]. Die mittlere absolute Restklaffung nach der Registrierung betrug 1,2 mm.

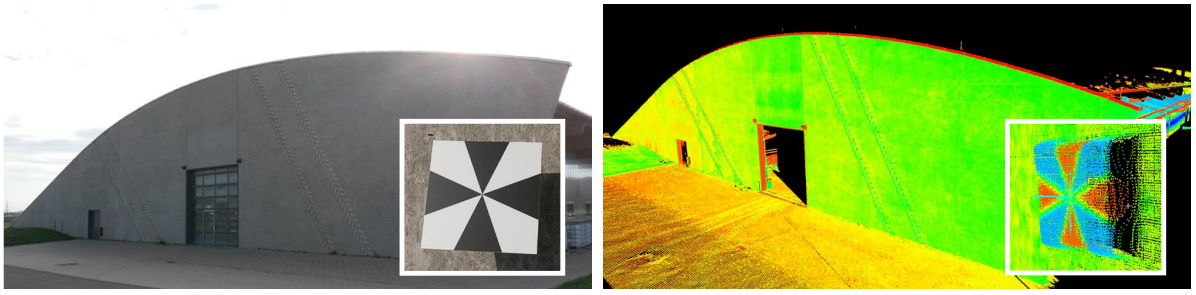


Abbildung 5.4: TLS-Referenzpunktwolken zur flächenhaften Evaluierung von kinematischen Multisensorsystemen. Die Punktwolken wurden mit einer Leica ScanStation P20 erfasst und unter Nutzung des Referenzfestpunktfeldes mit BOTA8-Targets hochgenau georeferenziert (Abbildung aus Heinz et al. [2020b]).

5.2.3 Ebenenbasiertes Kalibrierfeld

Zur Bestimmung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit auf einem Multisensorsystem befindet sich in der Einrichtung ein dauerhaft installiertes, ebenenbasiertes Kalibrierfeld (Abb. 5.5). Das Kalibrierfeld nimmt eine Fläche von 10 m × 20 m ein und besteht aus Mauerscheiben mit Sichtbetonoberfläche [KANN GmbH, 2020]. Bei den Mauerscheiben handelt es sich um standardisierte Elemente aus dem Tiefbau, wie sie z. B. zur Abstützung von Erdhängen eingesetzt werden. Die Nutzung solcher Standardelemente sichert eine kostengünstige Realisierung des Kalibrierfeldes. Die Mauerscheiben besitzen eine sehr hohe Planarität, die vorab mittels TLS überprüft wurde. Ferner sind die Mauerscheiben sehr stabil, robust und wetterresistent. Dies sind begünstigende Faktoren für eine permanente Installation im Outdoor-Bereich. Die Idee der Kalibrierung besteht darin, zunächst Referenzwerte für die Ebenen zu erzeugen. Anschließend werden die Ebenen mit dem Multisensorsystem erfasst und die Kalibrierparameter durch Minimierung der Abstände zwischen den Scanpunkten des kinematischen Laserscanningsystems und den Ebenen geschätzt [Strübing & Neumann, 2013]. Der Kalibrieransatz sowie das Design und die Evaluierung des Kalibrierfeldes werden in Abschnitt 5.4 im Detail diskutiert.

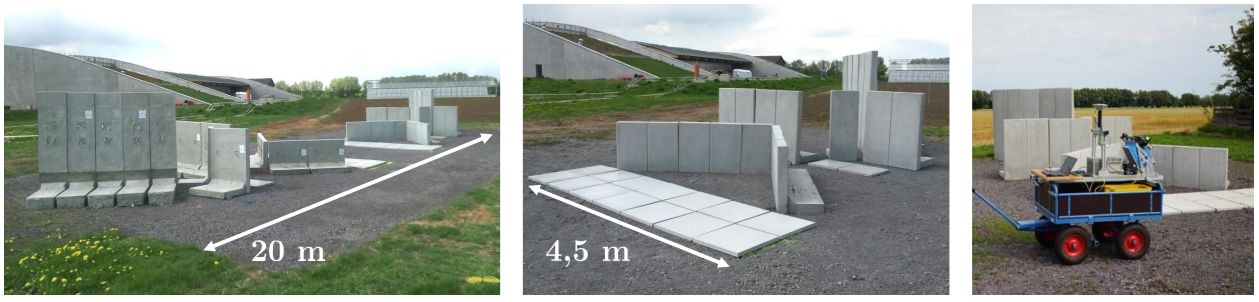


Abbildung 5.5: Ebenenbasiertes Kalibrierfeld am Campus Klein-Altendorf zur Bestimmung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit auf einem kinematischen Multisensorsystem (Abbildung aus Heinz et al. [2020b]).

Wie der Stand der Forschung in Abschnitt 2.2 zeigt, werden zur Kalibrierung kinematischer Multisensorsysteme im Outdoor-Bereich bisher Ebenen verwendet, die bereits in der Objektraumszene vorhanden sind oder dort temporär platziert werden. Dabei kann es sich sowohl um natürliche als auch künstliche Ebenen handeln. Für die Anordnung der Ebenen erfolgt zwar in der Regel eine Qualitätsbewertung, indem Maße wie Varianzen und Korrelationen der Kalibrierparameter, Sensitivität der Ebenen gegenüber den Kalibrierparametern, Ebenenresiduen nach der Kalibrierung oder das Konvergenzverhalten der Ausgleichung betrachtet werden; ein beabsichtigtes Design auf Basis einer vorangegangenen Konfigurationsanalyse mit einer anschließenden, dauerhaften Installation des Kalibrierfeldes wie in dieser Dissertation ist jedoch neu. Für den Bereich des kinematischen Laserscannings im Indoor-Bereich ist dies zwar bereits erfolgt (siehe z. B. Strübing & Neumann [2013]; Keller [2015]; Hartmann et al. [2017b, 2019]), allerdings erfolgt das Design in diesen Publikationen noch nicht unter Beachtung der Zuverlässigkeit; auch fehlt die Übertragung auf den Outdoor-Bereich.

5.3 Bestimmung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen für Profillaserscanner

Die erste in Abschnitt 1.2 formulierte Zielsetzung dieser Dissertation besteht in der Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen für die Distanzmessung von Profillaserscannern. Im Zuge dessen soll auch eine Analyse des Nahbereichs erfolgen, wo aufgrund der Defokussierung der Laseroptik und Abschattungen der Empfangsdiode mit erhöhter Ungenauigkeit zu rechnen ist. Dies ist insbesondere für kinematisches Laserscanning von Bedeutung, da Anwender sich sehr häufig mit kurzen Zielweiten < 20 m konfrontiert sehen (z. B. Messung von Straßenoberflächen oder Lichtraumprofilen). Die im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelte Methodik zur Analyse der Stochastik von Profillaserscannern wird in Abschnitt 5.3.1 beschrieben und anschließend auf den Z+F Profiler 9012A (Abschnitt 5.3.2) sowie den Hokuyo UTM-30LX-EW (Abschnitt 5.3.3) angewendet. In Abschnitt 5.3.4 werden Anwendungsmöglichkeiten der stochastischen Modelle im Kontext der Straßenzustandserfassung behandelt. Dies steht in Zusammenhang zur parameterbasierten Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme (Abschnitt 5.5.3).

5.3.1 Entwicklung einer Methodik für Profillaserscanner

In Publikation C wird eine Methodik zur Ableitung intensitätsbasierter stochastischer Modelle für die Distanzmessung von Profillaserscannern entwickelt. Diese Methodik überträgt bisherige Ansätze aus dem Bereich TLS [Wujanz et al., 2017, 2018], die einen 1D- oder 3D-Messmodus des Laserscanners voraussetzen, auf den 2D-Messmodus von Profillaserscannern, wie sie typischerweise beim kinematischen Laserscanning eingesetzt werden. Der Ansatz basiert darauf, dass gewöhnliche Oberflächen, wie sie in jeder Scanszene zu finden sind, statisch mit dem Profillaserscanner über einige Sekunden angemessen werden. Daraus ergibt sich in Abhängigkeit der Profilrate und der Scandauer eine große Menge sich überlappender Scanprofile, die als Wiederholungsmessungen der Oberfläche aufgefasst werden können. Bei der wiederholten Messung des Profils erfolgt die Abtastung der Oberfläche in festen Winkelschritten, die in jedem Scanprofil identisch sind. Daher können in den sich überlappenden Scanprofilen die einzelnen Winkelschritte des Profillaserscanners separiert werden. Zu jedem Winkelschritt gibt es also eine Menge an Distanzmessungen. Die Stichprobe der Distanzmessungen innerhalb eines Winkelschritts kann zur Berechnung einer empirischen Standardabweichung σ_d für die Distanzmessung d genutzt werden. Diese lässt sich anschließend zur mittleren Intensität I des Winkelschritts in Beziehung setzen. Eine höhere Intensität bedeutet ein geringeres Distanzmessrauschen und umgekehrt. Exemplarisch wird die Vorgehensweise in Abb. 5.6 illustriert. Wie in Wujanz et al. [2017, 2018] kann der Zusammenhang zwischen Distanzmessrauschen σ_d und Intensität I anschließend über die Gleichung $\sigma_d = a \cdot I^b + c$ beschrieben werden. Die stochastischen Modelle beschreiben die Präzision der Distanzmessung. Aussagen zur Richtigkeit lassen sich nicht tätigen. Der Aspekt der Richtigkeit der Distanzmessung wird im Kontext der äußeren Systemkalibrierung (Abschnitt 5.4) aufgegriffen.

Bei den Untersuchungen in Publikation C hat sich gezeigt, dass die beschriebene Methodik in beliebigen Indoor- und Outdoor-Szenen anwendbar ist und grundsätzlich keine zusätzliche Ausrüstung benötigt wird. Es werden keine Modellannahmen für die abgescannte Oberfläche getroffen. Zudem wird der Profillaserscanner in seinem normalen 2D-Messmodus betrieben. Diese Eigenschaften machen den Ansatz sehr praxistauglich und vor allem für jeden Anwender nutzbar. Bei den Messungen sollte jedoch auf gewisse Aspekte geachtet werden: Es sollte möglichst der gesamte relevante Intensitätsbereich des Laserscanners abgedeckt werden. Es sollten Rohintensitäten verwendet werden, die nicht vom Hersteller verändert wurden (z. B. durch eine Distanznormalisierung [Mettenleiter et al., 2015]). Wie Schmitz et al. [2019] zeigen, sind normierte Intensitäten jedoch auch unter gewissen Umständen nutzbar. Insgesamt ist es egal, ob unterschiedliche Intensitäten durch eine veränderte Messkonfiguration (Distanz und Einfallswinkel) oder die Objekteigenschaften (z. B. Farbe) hervorgerufen werden [Wujanz et al., 2017]. Um den Einfluss von Winkelabweichungen auf das Ergebnis auszuschließen, sollten die Oberflächen zudem nicht in zu großer Entfernung und unter einem zu schrägen vertikalen Einfallswinkel – d. h. in der Profilebene – angemessen werden. In diesem Zusammenhang liefert Publikation C eine Formel zur Abschätzung des Einflusses in Abhängigkeit der Winkelgenauigkeit. Ferner sollten die Oberflächen einigermaßen glatt und nicht spiegelnd sein; das Anmessen von Kanten sollte ebenfalls vermieden werden. Diese Restriktionen sind auch in Hinblick auf die Größe des Laserspots zu sehen.

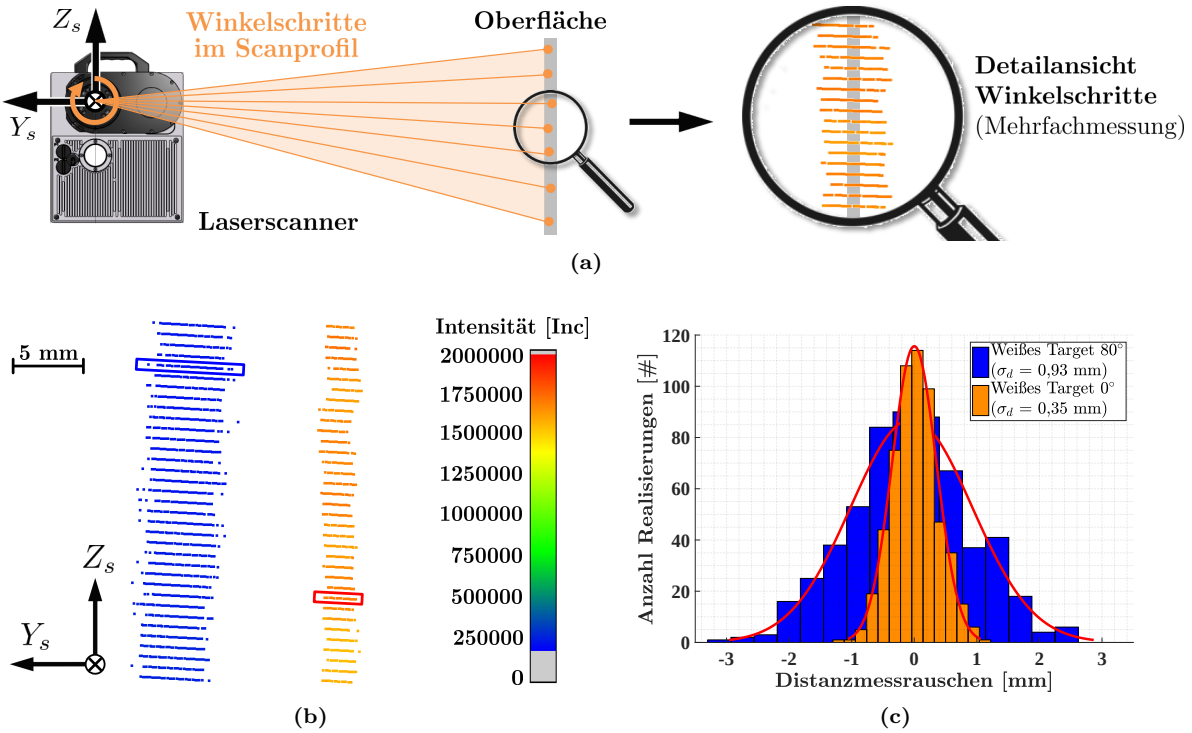


Abbildung 5.6: (a) Statisches Abscannen einer Oberfläche mit dem Profillaserscanner über einige Sekunden erzeugt eine Menge sich überlappender Scanprofile **(b)** Zwei intensitätskodierte Scans auf eine weiße Oberfläche in einer Distanz von 5 m mit einem horizontalen Einfallswinkel von 0° (orange) bzw. 80° (blau), **(c)** Verteilung der Distanzmessungen von zwei zufällig ausgewählten Winkelschritten, die in Abbildung (b) mit einem Rechteck gekennzeichnet sind. Die Streuung der Histogramme zeigt das Distanzmessrauschen σ_d an. Eine höhere Intensität führt zu einem geringeren Distanzmessrauschen und umgekehrt.

Die oben beschriebene Methodik wurde in Publikation C auf den Z+F Profiler 9012A angewendet (siehe Abschnitt 5.3.2). Um zu demonstrieren, dass die Methodik auch für andere Laserscanner nutzbar ist, wurde die Methodik zusätzlich auf den Hokuyo UTM-30LX-EW angewendet. Die Untersuchung des Hokuyo UTM-30LX-EW ist bisher nicht publiziert und wird in Abschnitt 5.3.3 erstmalig gezeigt.

5.3.2 Anwendung der Methodik auf den Z+F Profiler 9012A

In Publikation C werden verschiedene Experimente gemäß der vorgestellten Methodik mit allen drei verfügbaren Scanraten des Z+F Profiler 9012A durchgeführt (254 kHz, 508 kHz und 1016 kHz). Daraus ergeben sich drei intensitätsbasierte stochastische Modelle, die in Abb. 5.7 gezeigt sind. Die geschätzten Parameter der Modelle mitsamt der Genauigkeit der Parameter sind in Tab. 5.1 aufgelistet. Anhand der Ergebnisse erkennt man, dass die Präzision der Distanzmessung neben der Intensität auch von der gewählten Scanrate abhängt [Wujanz et al., 2017]. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass bei kleineren Scanraten aufeinanderfolgende Messungen gemittelt werden, was zu einer Steigerung der Präzision führt. Nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz [Niemeier, 2008; Förstner & Wrobel, 2016] ergibt sich für unkorrelierte Beobachtungen laut Theorie eine Steigerung der Präzision um einen Faktor $\sqrt{2}$ bei Halbierung der Scanrate. Die Analyse der geschätzten stochastischen Modelle zeigt, dass dieser Faktor auch empirisch nachweisbar ist. So beträgt das Verhältnis zwischen den Modellen für 1016 kHz und 508 kHz in Abb. 5.7d im Mittel $1{,}41 = \sqrt{2}$. Der Faktor zwischen den Modellen für 508 kHz und 254 kHz beträgt $1{,}28 < \sqrt{2}$. Dies ist vermutlich damit zu erklären, dass die Präzision bei der kleinsten Scanrate von 254 kHz aufgrund der Diskretisierung der Distanzmessung nicht bis zu einem Faktor $\sqrt{2}$ gesteigert werden kann. Laut Informationen der Firma Zoller & Fröhlich GmbH beträgt die Auflösung der Distanzmessung 0,1 mm, wobei die Repräsentation in der

Signalverarbeitung bei 0,17 mm pro Bit liegt. Eine andere denkbare Erklärung sind positive Korrelationen zwischen den Messungen, die die Steigerung der Präzision limitieren [Schabenberger & Gotway, 2005].

Wie bereits in Abschnitt 3.2 behandelt, kommt es beim Z+F Profiler 9012A im Nahbereich aufgrund einer Defokussierung der Laseroptik und Abschattungseffekten der Empfangsdiode zu einer Minderung der Signaleingangsleistung, die zu erhöhtem Distanzmessrauschen führt. Der Z+F Profiler 9012A ist jedoch mit einer Nahbereichsoptimierung ausgestattet, die diesen Effekt durch Modifikation der Hardware abmildert. Details zu dieser Optimierung werden von der Zoller & Fröhlich GmbH nicht kommuniziert. Dennoch erfolgte in Publikation C eine Analyse des Nahbereichs, um die Wirkung der Optimierung empirisch zu untersuchen und zu prüfen, ob die intensitätsbasierten Modelle auch im Nahbereich uneingeschränkt gültig sind.

Tabelle 5.1: Geschätzte Parameter der intensitätsbasierten stochastischen Modelle für den Z+F Profiler 9012A mitsamt der geschätzten Genauigkeit der Parameter für alle drei Scanraten (254 kHZ, 508 kHZ und 1016 kHz).

Scanrate	$\hat{a}\ [\frac{m}{Inc}]$	$\hat{\sigma}_a$	$\hat{b}\ [-]$	$\hat{\sigma}_b$	$\hat{c}\ [m]$	$\hat{\sigma}_c$
254 kHz	7,09896	0,03902736	-0,80377	0,00055374	0,00014	0,00000030
508 kHz	8,21610	0,02611121	-0,78192	0,00031518	0,00015	0,00000026
1016 kHz	15,67256	0,03579010	-0,81170	0,00022396	0,00024	0,00000024

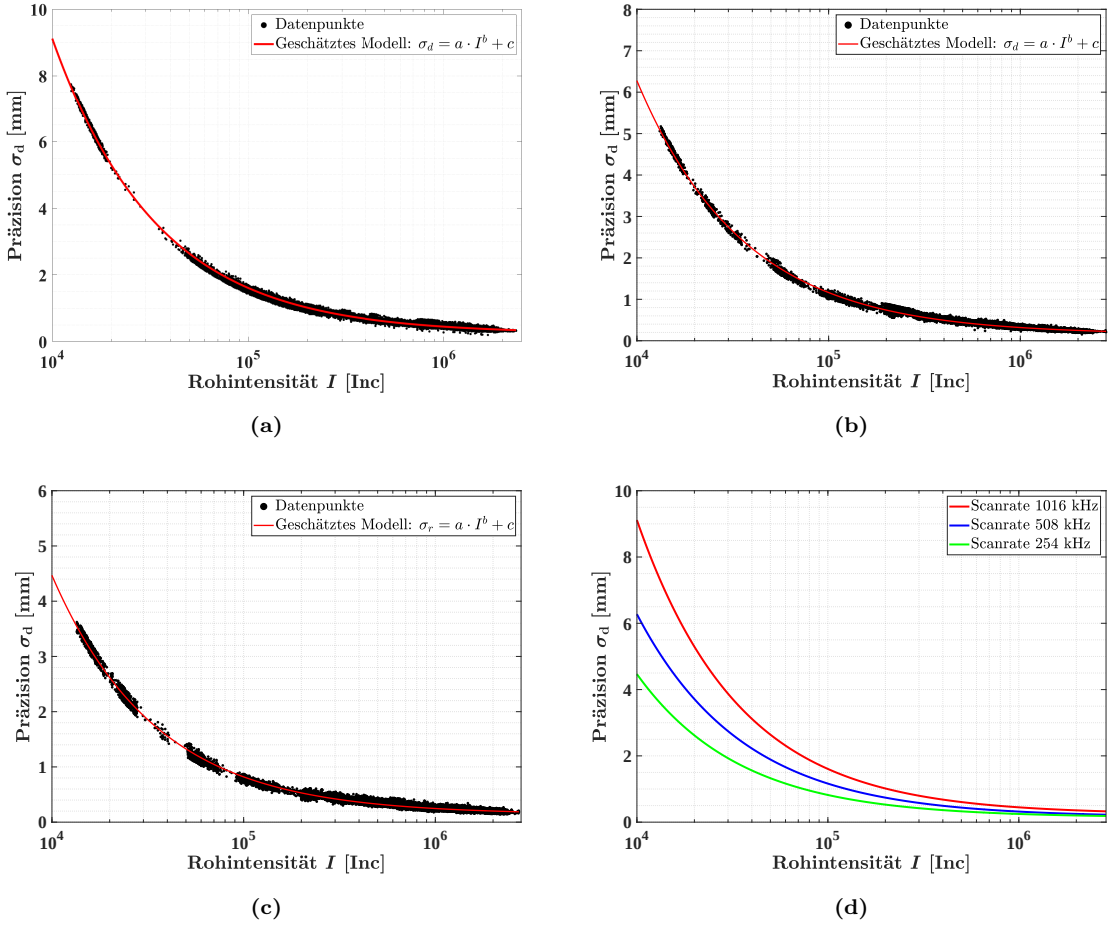


Abbildung 5.7: Intensitätsbasierte stochastische Modelle für die Präzision der Distanzmessung des Z+F Profiler 9012A für alle drei verfügbaren Scanraten: (a) 1016 kHz, (b) 508 kHz, (c) 254 kHz, (d) alle Modelle.

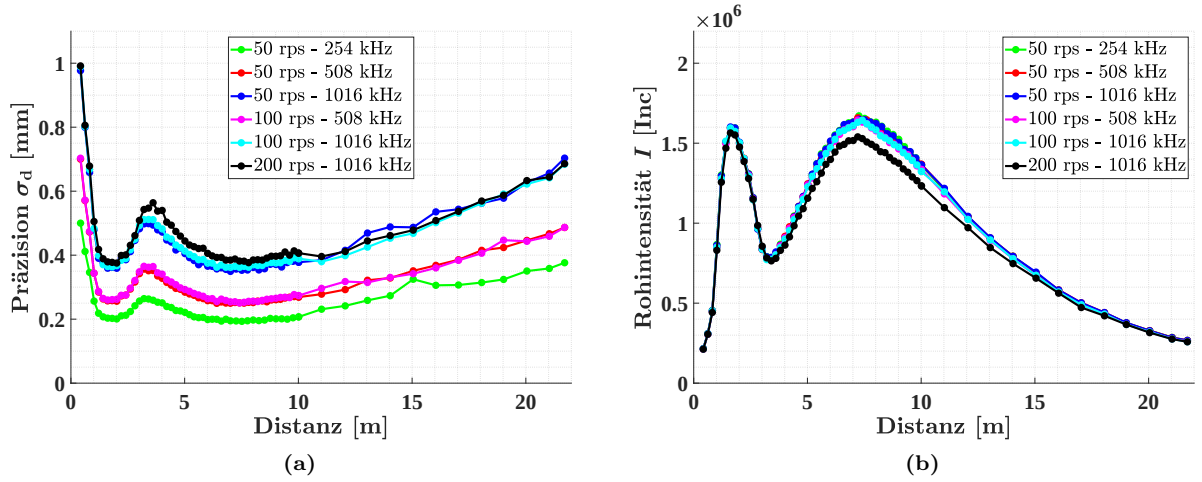


Abbildung 5.8: (a) Präzision σ_d und **(b)** Intensität I der Distanzmessungen des Z+F Profiler 9012A als Funktion der Distanz. Die Ergebnisse beziehen sich auf Messungen auf eine weiße Oberfläche mit den sechs möglichen Einstellungen des Sensors hinsichtlich Profilrate (50 rps, 100 rps, 200 rps) und Scanrate (254 kHz, 508 kHz, 1016 kHz).

In Abb. 5.8a ist das Ergebnis von sechs Messreihen gezeigt, bei denen eine weiße Platte auf einer Komparatorbahn im Distanzbereich von 0,4 m bis 22 m statisch mit dem Z+F Profiler 9012A unter einem Einfallswinkel von 0° abgescannt wurde. Anders als beim stochastischen Modell wird das Distanzrauschen σ_d als Funktion der Distanz aufgetragen. Die sechs Messreihen korrespondieren zu den sechs möglichen Einstellungen des Z+F Profiler 9012A hinsichtlich Profilrate (50 rps, 100 rps, 200 rps) und Scanrate (254 kHz, 508 kHz, 1016 kHz). Alle Kurven folgen dem gleichen Muster. Die Präzision ist unmittelbar vor dem Laserscanner am schlechtesten und sinkt dann aufgrund der Nahbereichsoptimierung auf ein lokales Minimum bei rund 2 m ab. Im Distanzbereich zwischen 2 m und 5 m steigt und fällt die Präzision wieder mit dem Maximum bei etwa 3,5 m. Ausgehend von einem zweiten lokalen Minimum bei etwa 8 m steigt die Präzision monoton an. Der monotone Anstieg ist auf die Signaldämpfung mit dem Quadrat der Distanz (vgl. Radar-Laser-Gleichung in Gl. (3.13) und Pfeifer et al. [2017]) zurückzuführen. Dementsprechend zeigen die Intensitätskurven in Abb. 5.8b ein zur Präzision entgegengesetztes Verhalten. Für den Intensitätsabfall zwischen 10 m und 20 m in Abb. 5.8b ergibt sich gemäß Gl. (3.14) im arithmetischen Mittel über alle sechs Kurven ein Dämpfungsfaktor von -12,29 dB, der sehr gut mit dem theoretischen Wert von -12 dB aus Abb. 3.4 zusammenpasst.

Die Intensitätskurven sind unabhängig von der Einstellung des Laserscanners deckungsgleich. Dies belegt, dass die Präzisionssteigerung bei geringerer Scanrate (siehe Abb. 5.7 und Abb. 5.8a) nicht durch die Laserintensität, sondern durch Punktmittelungen bewirkt wird. Abb. 5.8a ist zudem ein Beleg dafür, dass es egal ist, auf welche Weise eine Scanrate durch das Zusammenspiel von Profilrate und Profilauflösung erzeugt wird. So liegen in Abb. 5.8a die rote und die magentafarbene Kurve genauso übereinander wie die blaue, die cyanfarbene und die schwarze Kurve. Bei der schwarzen Kurve fällt auf, dass diese im Bereich < 10 m etwas überhalb der anderen beiden Kurven liegt. Da die zugehörige Intensitätskurve in Abb. 5.8b in diesem Bereich jedoch auch unterhalb der anderen beiden liegt, ist dies im Sinne der intensitätsabhängigen Stochastik konsistent. Die Ursache für dieses Verhalten konnte nicht abschließend geklärt werden. Die Daten in Abb. 5.8 sind darüber hinaus vollständig konsistent mit den zuvor abgeleiteten stochastischen Modellen aus Abb. 5.7. Dies zeigt, dass die Modellierung auch im Nahbereich gültig ist. Die Ergebnisse zur distanzabhängigen Präzision des Z+F Profiler 9012A verdeutlichen die besonderen Anforderungen im Nahbereich. Dies wird in Publikation D im Rahmen einer Straßenzustandserfassung eingehender analysiert (Abschnitt 5.3.4).

Von erhöhtem Messrauschen im Nahbereich im Kontext der ebenenbasierten Kalibrierung eines kinematischen Laserscanningsystems im Indoor-Bereich wird auch in Hartmann et al. [2017b] berichtet. In der genannten Publikation kommt ein Z+F Imager 5006 im Profilmodus zum Einsatz. Ursächlich dafür könnte die Distanzmessung sein. Dies verdeutlicht, dass die oben gezeigten Untersuchungen auch für den Indoor-Bereich relevant sind, wo ebenfalls häufig kurze Zielweiten auftreten.

5.3.3 Anwendung der Methodik auf den Hokuyo UTM-30LX-EW

Um die Anwendbarkeit der Methodik zur Ableitung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen auch für andere Profillaserscanner nachzuweisen, werden in diesem Abschnitt Ergebnisse für den Hokuyo UTM-30LX-EW gezeigt, die bisher nicht publiziert sind. Analysen zur distanzabhängigen Präzision des Hokuyo UTM-30LX-EW wurden zwar bereits in Publikation A durchgeführt, allerdings wurden diese nicht mit der Intensität in Verbindung gebracht. Publikation A zeigt, dass die Präzision der Distanzmessung des Hokuyo UTM-30LX-EW im Distanzbereich bis 10 m bei einer Standardabweichung von rund $\sigma_d = 5$ mm liegt und danach mit etwa 0,5 mm/m ansteigt, sodass die Präzision bei einer Distanz von 30 m etwa $\sigma_d = 15$ mm beträgt. Anders als beim Z+F Profiler 9012A ist beim Hokuyo UTM-30LX-EW jedoch kein Nahbereichseffekt nachweisbar. Dies könnte auf das deutlich höhere Rauschniveau des Hokuyo UTM-30LX-EW im Vergleich zum Z+F Profiler 9012A zurückzuführen sein. Im Gegensatz zum Z+F Profiler 9012A besitzt der Hokuyo UTM-30LX-EW eine feste Scanrate von 43 kHz. Zur Bestimmung eines intensitätsbasierten stochastischen Modells wurden gewöhnliche Umgebungen statisch über mehrere Sekunden mit dem Sensor abgescannt und die in Abschnitt 5.3.1 beschriebene Methodik angewendet. Das resultierende Modell ist in Abb. 5.9 abgebildet. Tab. 5.2 zeigt die geschätzten Modellparameter mitsamt ihrer geschätzten Genauigkeit.

Tabelle 5.2: Geschätzte Parameter des intensitätsbasierten stochastischen Modells für den Hokuyo UTM-30LX-EW mitsamt der geschätzten Genauigkeit der Parameter für die feste Scanrate von 43 kHz.

Scanrate	$\hat{a}\ [\frac{m}{Inc}]$	$\hat{\sigma}_a$	$\hat{b}\ [-]$	$\hat{\sigma}_b$	$\hat{c}\ [m]$	$\hat{\sigma}_c$
43 kHz	0,21539	0,00290234	−0,55988	0,00281423	0,00229	0,00002341

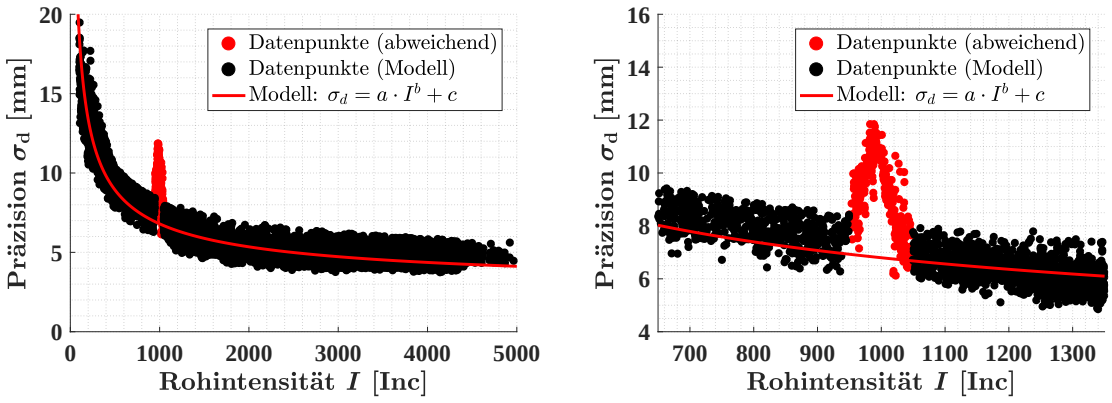


Abbildung 5.9: Links: Intensitätsbasiertes stochastisches Modell für die Präzision der Distanzmessung des Profillaserscanner Hokuyo UTM-30LX-EW. **Rechts**: Die Distanzmessungen im Intensitätsbereich $I \in [950{,}1050]$ zeigen ein abweichendes Verhalten gegenüber dem Modell. Die Ursache dafür ist unklar, der Effekt jedoch reproduzierbar.

Die im Intensitätsbereich $I \in [0{,}5000]$ berechneten Standardabweichungen decken den in Publikation A festgestellten Bereich von $\sigma_d = 5$ mm bis 15 mm für die Präzision der Distanzmessung ab. In Abb. 5.9 fällt jedoch auf, dass die rot markierten Punkte im Bereich $I \in [950{,}1050]$ nicht zur charakteristischen Form des Standardmodells ($\sigma_d = a \cdot I^b + c$) passen. Diese Punkte wurden folglich auch nicht zur Bestimmung des stochastischen Modells verwendet. Die Ursache für das abweichende Verhalten ist bislang unklar. Die Abweichung ist jedoch reproduzierbar. Abgesehen davon folgen die Messungen des Hokuyo UTM-30LX-EW dem Modell recht gut. Es ist nicht bekannt, ob und inwiefern die gemessenen Intensitäten des Hokuyo UTM-30LX-EW vom Hersteller skaliert werden. Wie jedoch bereits Schmitz et al. [2019] zeigen, können auch skalierte Intensitäten mit gewissen Einschränkungen zur Ableitung eines stochastischen Modells verwendet werden. Der Hokuyo UTM-30LX-EW ist mit einer besonderen Multi-Echo-Technologie ausgestattet, sodass zu jedem ausgesandten Laserimpuls bis zu drei Echos empfangen werden. Dies ist bei Messungen auf transparente Oberflächen, Vegetation oder Rauch bzw. Nebel hilfreich [Djuricic & Jutzi, 2013]. Untersuchungen zeigen, dass das stochastische Modell auch für empfangene zweite und dritte Echos gilt.

Die Ergebnisse für den Z+F Profiler 9012A (siehe Abschnitt 5.3.2) sowie den Hokuyo UTM-30LX-EW (siehe Abschnitt 5.3.3) belegen, dass die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Methodik zur Bestimmung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen für die Distanzmessung auf unterschiedliche Profillaserscanner anwendbar ist. Die so abgeleiteten Modelle geben erweiterte Einblicke in die Genauigkeit von kinematischen Laserscanningsystemen und können als Baustein im stochastischen Modell der Systeme genutzt werden.

5.3.4 Anwendung der Modelle im Bereich Straßenzustandserfassung

Die intensitätsbasierten stochastischen Modelle ermöglichen es, das Genauigkeitspotential kinematischer Laserscanningsysteme besser zu bewerten. Diesbezüglich zeigt Abb. 5.10 einen Abschnitt der Autobahn A44n, die in Publikation D mit dem fahrzeuggetragenen Mobile Mapping System (siehe Abschnitt 5.1.2) erfasst wurde. Der Ausschnitt wurde mit zwei unterschiedlichen Scanraten des Z+F Profiler 9012A gescannt (508 kHz und 1016 kHz). Dabei variierte die Profilrate des Profillaserscanners (100 rps bzw. 200 rps). Für beide Fälle ist jeweils die Intensität I des Laserstrahls und die aus dem stochastischen Modell abgegriffene Standardabweichung σ_d für die Präzision der Distanzmessung abgebildet. Man erkennt, dass die Intensität unabhängig von der Scanrate in beiden Fällen mehr oder weniger identisch ist, während die Präzision der Messung stark schwankt. Insbesondere auf der rechten Fahrspur sowie der Standspur übersteigt das Rauschen bei 1016 kHz den Wert von 6 mm, wohingegen die Werte bei 508 kHz unter 4 mm bleiben. In den Punktwolken sind in diesen Bereichen unterschiedlich starke Rauschbänder vorhanden. Die unterschiedliche Präzision der beiden Messungen ist auch in den Häufigkeitsverteilungen der Rauschwerte σ_d deutlich erkennbar.

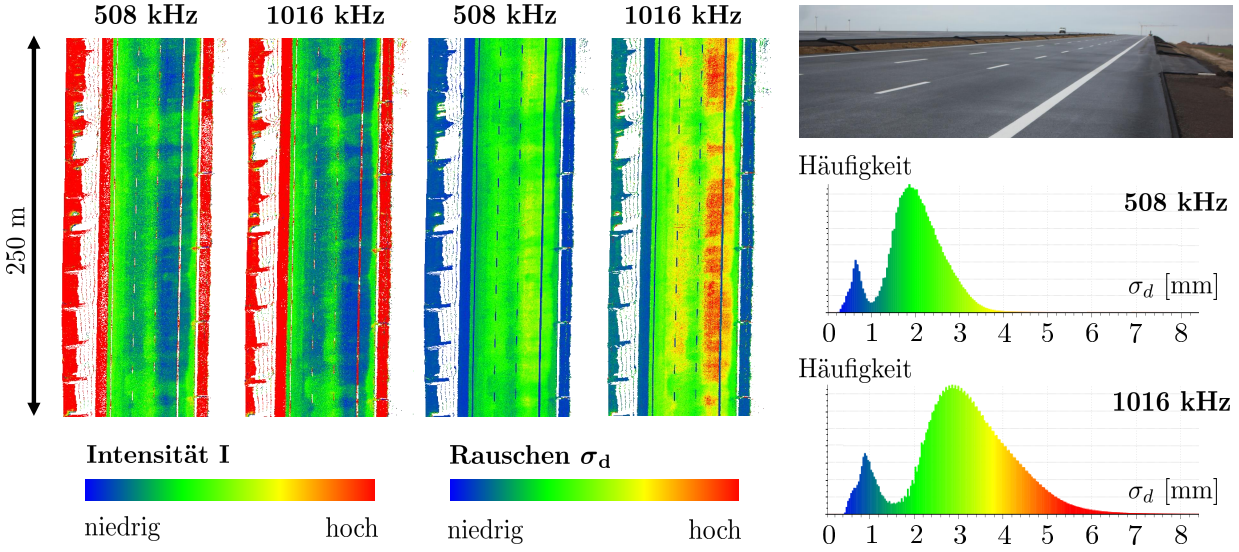


Abbildung 5.10: Ausschnitt einer Punktwolke der Autobahn A44n, die mithilfe des Profillaserscanners Z+F Profiler 9012A des Mobile Mapping Systems erfasst wurde. Die Erfassung erfolgte mit Scanraten von 508 kHz und 1016 kHz, was in Abhängigkeit der Intensität I des Laserstrahls zu unterschiedlichen Präzisionen σ_d der Distanzmessung führt.

Bedeutung besitzen diese Erkenntnisse zum Beispiel für die Ableitung von Straßenzustandsparametern aus den Punktwolken. In Publikation D erfolgt die Bestimmung der Spurrinnentiefe aus den Profilen des Laserscanners [FGSV, 2009]. Die Spurrinnentiefe als Formparameter für die Ebenheit der Fahrbahn in Querrichtung ist maßgeblich von der Präzision und Richtigkeit der Messungen des Profillaserscanners abhängig. Demzufolge lassen sich auf der rechten Fahrspur bei Verwendung einer Scanrate von 508 kHz potentielle Spurrinnen früher detektieren. Auch kann die Signifikanz der berechneten Spurrinnentiefen anhand des stochastischen Modells besser geprüft werden. In Publikation D wird aus den georeferenzierten Profilen auch die Querneigung der Autobahn abgeleitet [FGSV, 2009]. Dies erfolgt durch eine Geradenausgleichung der 2D-Profile der Straßenoberfläche. Dabei kann das intensitätsbasierte stochastische Modell in die Ausgleichung

integriert werden, um der variierenden Genauigkeit der Scanpunkte zu begegnen (siehe Abb. 5.10). Dies trägt dazu bei, die Zielgrößen erwartungstreuer zu schätzen. Die Analyse von Straßenzustandsparametern wird in Abschnitt 5.5.3 im Rahmen der Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme tiefergehend behandelt.

Das Fazit dieser Betrachtungen ist, dass bei Anwendungen – wie z. B. der Straßenzustandserfassung – auf eine adäquate Wahl der Einstellungen des Laserscanners zu achten ist. Dies betrifft zunächst die Präzision, die unter anderem aus der gewählten Scanrate resultiert. Die Präzision konkurriert jedoch mit der Auflösung der Punktwolke, die sich aus den Kenngrößen Punktauflösung im Profil, Profilrate sowie Geschwindigkeit der Plattform zusammensetzt. So führt eine kleinere Scanrate zwar zu einer verbesserten Präzision, aber gleichzeitig auch zu einer Verringerung der Auflösung. Dadurch können Informationen aus dem Objektraum verloren gehen, wenn sie nicht ausreichend dicht abgetastet werden. Im Falle von Spurrinnen, die eine begrenzte räumliche Ausdehnung haben, kann dies beispielsweise relevant sein. Im Zweifelsfall kann dies dazu führen, dass die Auflösung zu Kosten der Präzision erhöht werden muss. Eine höhere Auflösung lässt sich jedoch auch unter dem Aspekt der Präzision rechtfertigen, da mehr – wenn auch unpräzisere – Punkte ebenfalls zu einer Steigerung der Präzision von aus Punktwolken abzuleitenden Modellen oder Parametern führen können. Dabei liegt die vereinfachte Annahme zugrunde, dass im statistischen Mittel wenige unpräzise Punkte zum gleichen Ergebnis führen wie viele präzise Punkte. Bei dieser Betrachtungsweise rückt die Präzision des Einzelpunktes in den Hintergrund. Allerdings müssen ausreichend viele Punkte vorhanden sein, um die Zielgrößen zuverlässig schätzen zu können. Bei Oberflächen mit radiometrisch schlechten Eigenschaften – wozu auch dunkle Straßenoberflächen zählen – oder unter ungünstigen Messkonfigurationen kann es jedoch durchaus sinnvoll sein, auf eine kleinere Scanrate und damit höhere Präzision des Einzelpunktes zu setzen, da die Mittelbildung von Punkten dazu beitragen kann, das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Eine Diskussion zu dieser Thematik im Kontext von TLS findet sich in einer anderen Publikation des Autors dieser Dissertation (siehe Heinz et al. [2019b]).

5.3.5 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

Die wesentlichen Erkenntnisse der Abschnitte 5.3.1 bis 5.3.4 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es wurde eine Methodik zur Bestimmung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen für die Präzision der Distanzmessung von Profillaserscannern mit 2D-Messmodus entwickelt. Dies stellt eine Erweiterung der Ansätze aus dem Bereich TLS dar, die einen 1D- bzw. 3D-Messmodus des Laserscanners voraussetzen. Durch die Erweiterung auf Profillaserscanner ist es nun möglich, intensitätsbasierte Modelle auch als Baustein im stochastischen Modell kinematischer Laserscanningsysteme zu nutzen.
- Der funktionale Zusammenhang zwischen Distanzmessrauschen σ_d und Intensität I lässt sich im Falle von Profillaserscannern genau wie im Bereich TLS über die Gleichung $\sigma_d = a \cdot I^b + c$ beschreiben.
- Die entwickelte Methodik kommt ohne zusätzliche Messausrüstung aus, ist im normalen Gebrauch der Instrumente anwendbar und auf unterschiedliche Profillaserscanner übertragbar. Dies wurde anhand des Z+F Profiler 9012A (high-end) sowie des Hokuyo UTM-30LX-EW (low-cost) nachgewiesen.
- Abschattungs- und Defokussierungseffekte innerhalb der Laseroptik können im Nahbereich zu einem erhöhten Distanzmessrauschen führen. Die Untersuchung der diesbezüglichen Nahbereichsoptimierung des Z+F Profiler 9012A bestätigt eine Verbesserung der Präzision der Distanzmessung im Bereich zwischen 1 m und 3,5 m. Ferner lässt sich nachweisen, dass die intensitätsbasierten stochastischen Modelle für den Z+F Profiler 9012A auch im Nahbereich < 5 m Gültigkeit besitzen. Diese Erkenntnisse sind für kinematisches Laserscanning sehr bedeutend, da man sich bei vielen Anwendungen mit kurzen Zielweiten konfrontiert sieht (z. B. Lichtraumprofilmessung oder Straßenzustandserfassung).
- Es werden Anwendungsmöglichkeiten von intensitätsbasierten stochastischen Modellen bei der Straßenzustandserfassung aufgezeigt. Die Modelle können bei der Wahl der passenden Scannereinstellungen in Bezug auf Auflösungs- und Qualitätsstufe genutzt werden. Ferner helfen die stochastischen Modelle bei der korrekten Auswertung der Messdaten und Bewertung der Ergebnisse.

5.4 Ebenenbasierte Systemkalibrierung für kinematische Laserscanningsysteme

Die zweite in Abschnitt 1.2 formulierte Zielsetzung der vorliegenden Dissertation besteht darin, auf Grundlage einer geodätischen Konfigurationsanalyse eine Ebenenanordnung abzuleiten, die eine genaue, zuverlässige und sensitive Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit ermöglicht, die zudem möglichst geringe Korrelationen zwischen den Parametern aufweist. Ergänzend soll analysiert werden, ob die Ebenenanordnung sensitiv gegenüber der Schätzung einer Nullpunktabweichung für den Profillaserscanner ist. Die Analyse der Nullpunktabweichung befasst sich mit der Richtigkeit des Laserscanners und ist in Ergänzung zu den stochastischen Modellen aus Abschnitt 5.3 zu sehen, die die Präzision des Laserscanners beschreiben. Auf Basis der Ergebnisse der Konfigurationsanalyse soll ein dauerhaft installiertes Kalibrierfeld realisiert werden.

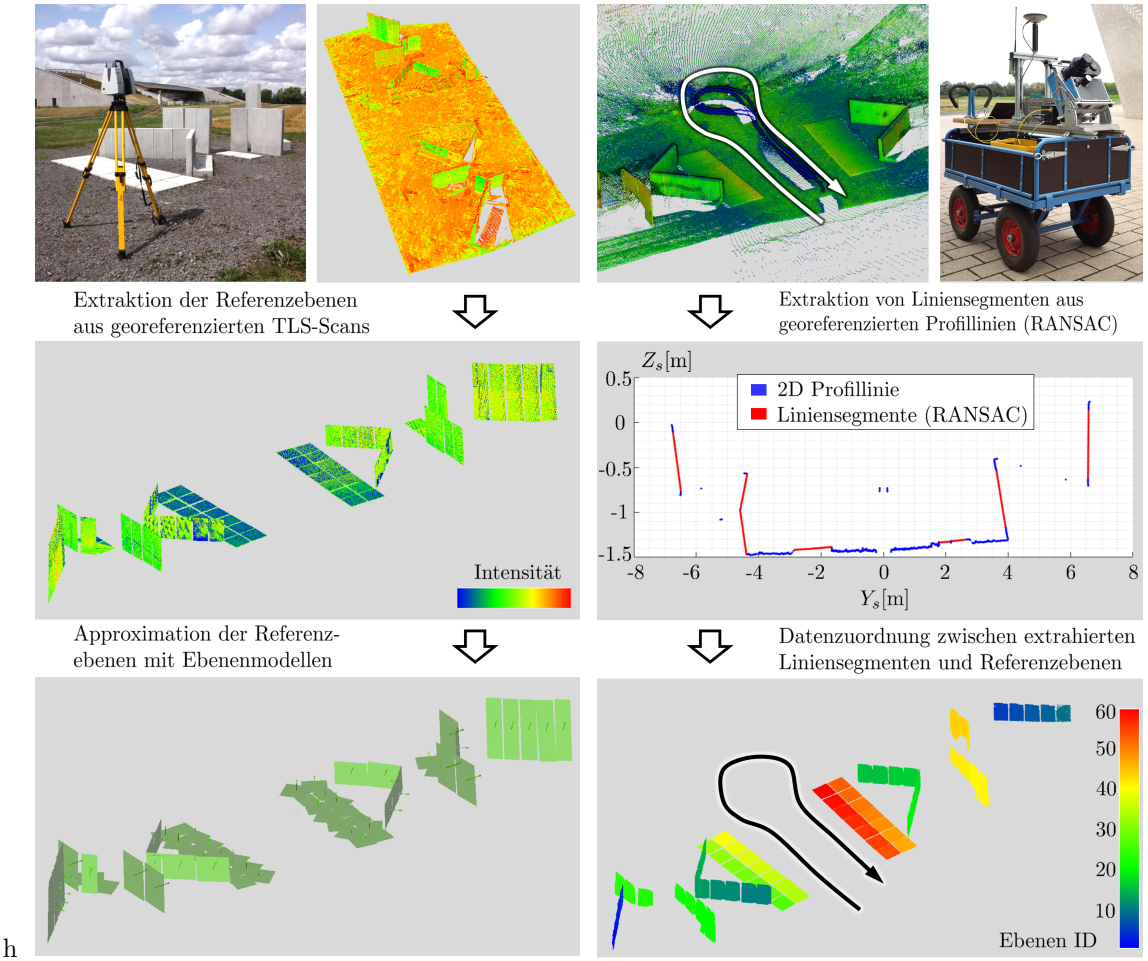
Im Folgenden wird in Abschnitt 5.4.1 das Grundprinzip des ebenenbasierten Kalibrierverfahrens vorgestellt. Die wesentlichen Erkenntnisse der Konfigurationsanalyse werden anschließend in Abschnitt 5.4.2 zusammengefasst. Basierend auf der Konfigurationsanalyse wurde das in Abschnitt 5.2.3 beschriebene ebenenbasierte Kalibrierfeld am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn in Form einer dauerhaften Installation realisiert. Abschnitt 5.4.3 demonstriert die praktische Einsatzfähigkeit des Kalibrierfeldes anhand der Kalibrierung des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems aus Abschnitt 5.1.2.

5.4.1 Ebenenbasiertes Kalibrierverfahren

Das in dieser Dissertation verwendete ebenenbasierte Kalibrierverfahren basiert methodisch auf dem in Strübing & Neumann [2013] veröffentlichten Kalibrieransatz, der auch in anderen Publikationen genutzt wird (siehe z. B. Keller [2015]; Hong et al. [2017]; Hartmann et al. [2017b, 2019]). Anwendung findet das Verfahren in Publikation A zur Kalibrierung des tragbaren low-cost Laserscanningsystems (siehe Abschnitt 5.1.1) und in den Publikationen B und E zur Kalibrierung des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems (siehe Abschnitt 5.1.2). In den Publikationen A, B und E haben mehrere Modifikationen und Erweiterungen des Kalibrierverfahrens stattgefunden. Insofern ist das endgültige Kalibrierverfahren als Produkt eines fortschreitenden Entwicklungsprozesses zu sehen. In diesem Abschnitt wird das Kalibrierverfahren zunächst in seiner endgültigen Form vorgestellt (siehe Publikation E). Am Ende des Abschnittes werden basierend darauf die Modifikationen gegenüber den Publikationen A und B herausgestellt. Ferner werden die wesentlichen Unterschiede des endgültigen Kalibrierverfahrens im Vergleich zu den Arbeiten von Strübing & Neumann [2013]; Keller [2015]; Hong et al. [2017] sowie Hartmann et al. [2017b, 2019] benannt. Der Ablauf des Kalibrierverfahrens ist schematisch in Abb. 5.11 dargestellt. Zur Beschreibung des Kalibrierverfahrens wird an dieser Stelle von einer gegebenen Ebenenanordnung ausgegangen, die der des am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn realisierten Kalibrierfeldes entspricht (siehe Abb. 5.5). Die Ableitung dieser Ebenenanordnung auf Grundlage einer geodätischen Konfigurationsanalyse wird in Abschnitt 5.4.2 eingehender behandelt.

Der erste Schritt der Kalibrierung umfasst die Bestimmung von Referenzwerten für die Normalen der Ebenenanordnung (Abb. 5.11a). Dazu wird die Ebenenanordnung mithilfe von TLS aufgenommen und unter Nutzung des Referenzfestpunktfeldes aus Abschnitt 5.2.1 georeferenziert. Durch die georeferenzierten Ebenenpunkte $[x, y, z]^T_{TLS}$ werden im Anschluss Ebenenmodelle mit Normale $[n_x, n_y, n_z]^T$ und Abstandsparameter d_n geschätzt. Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung des Kalibrierfeldes kann die Kalibrierung grundsätzlich im e-frame oder im l-frame durchgeführt werden. Zur besseren Analyse von Lage und Höhe erfolgt die Berechnung im l-frame, bei dem es sich um ein lokal verebnetes Bezugssystem handelt, dessen Ursprung in der Mitte der Ebenenanordnung definiert werden kann (vgl. Abschnitt 3.1). Für die Schätzung der Ebenenparameter gilt der funktionale Zusammenhang aus Gl. (5.1), wobei der Normalenvektor $[n_x, n_y, n_z]^T$ mit dem Abstandsparameter d_n skaliert wird, um in der zugrunde liegenden Ausgleichung auf eine Restriktion für die Normalisierung der Normale verzichten zu können [Holst et al., 2014]:

$$\left[x_l, y_l, z_l\right]_{TLS} \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} - d_n = \left[x_l, y_l, z_l\right]_{TLS} \cdot \begin{bmatrix} \bar{n}_x \\ \bar{n}_y \\ \bar{n}_z \end{bmatrix} - 1 \stackrel{!}{=} 0. \tag{5.1}$$



(a) Georeferenzierte Normalen $\left[\bar{n}_x, \bar{n}_y, \bar{n}_z\right]^T$ **(b)** Georeferenzierte Punkte $\left[x_e, y_e, z_e\right]^T_{MLS}$

Abbildung 5.11: (a) Bestimmung von Referenzwerten für die Ebenennormalen mittels TLS, **(b)** Bestimmung einer Punktwolke der Ebenenanordnung mithilfe des kinematischen Laserscanningsystems. Die Trajektorie des Systems ist durch einen Pfeil angedeutet. Die Scanpunkte des mobilen Systems werden automatisch aus den Profillinien extrahiert und der jeweiligen Referenzebene zugeordnet (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert).

Die geschätzten, skalierten Normalenvektoren $[\bar{n}_x, \bar{n}_y, \bar{n}_z]^T$ gehen als Referenzinformation in die Schätzung der Kalibrierparameter des kinematischen Laserscanningsystems ein.

Im zweiten Schritt wird die Ebenenanordnung mit dem kinematischen Laserscanningsystem aus der Bewegung heraus aufgenommen (Abb. 5.11b). Unter Nutzung der Georeferenzierungsgleichung aus Gl. (3.9) und Näherungswerten für die Kalibrierparameter kann eine georeferenzierte Punktwolke des Multisensorsystems bestimmt werden, deren Punkte $[x_l, y_l, z_l]^T_{MLS}$ die zuvor mittels TLS bestimmten Ebenengleichungen aus Gl. (5.1) erfüllen müssen. Daraus ergibt sich folgende Beobachtungsgleichung für die Kalibrierung:

$$\underbrace{\left[\begin{bmatrix} t_e \\ t_n \\ t_h \end{bmatrix} + \boldsymbol{R}^n_b(\phi,\theta,\psi) \cdot \left(\boldsymbol{R}^b_s(\alpha,\beta,\gamma) \begin{bmatrix} 0 \\ (d_s + d_0) \cdot \sin b_s \\ (d_s + d_0) \cdot \cos b_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \right) \right]^T}_{[x_l, y_l, z_l]^T_{MLS}} \cdot \begin{bmatrix} \bar{n}_x \\ \bar{n}_y \\ \bar{n}_z \end{bmatrix} - 1 \overset{!}{=} 0. \tag{5.2}$$

Dies führt auf ein Normalgleichungssystem, das im Rahmen einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten im Gauß-Helmert Modell gelöst werden kann. In der Ausgleichung werden die Normalen $[\bar{n}_x, \bar{n}_y, \bar{n}_z]^T$ als varianz-

frei angenommen. Es ist jedoch auch möglich, die Normalen als Beobachtungen mit einer Varianzinformation in die Ausgleichung einzuführen oder – wie in Publikation A und B praktiziert – das Normalgleichungssystem aus Gl. (5.2) um die Beobachtungsgleichungen aus Gl. (5.1) zu ergänzen und die Ebenennormalen simultan mit den Kalibrierparametern zu schätzen. Die Variante die Ebenennormalen vorab zu schätzen und dann als varianzfrei in der Kalibrierung zu verwenden wurde in Publikation E aus folgenden Gründen gewählt:

- Die Modifikation führt zu einer deutlichen Verkleinerung des Normalgleichungssystems, dessen Größe in Publikation E im Vergleich zu den Publikationen A und B durch die kinematische Kalibrierung und die Verwendung von mehr Ebenen sehr stark angewachsen ist. Zudem hat die sehr große Matrix $\boldsymbol{B}\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\boldsymbol{B}^T$ eine für die Inversion der Matrix sehr günstige Blockdiagonalstruktur (vgl. hierzu Gl. (3.21) ff.). Beides verbessert die Berechnungseffizienz enorm und führt dazu, dass die Ausgleichung auf einem Standard-PC innerhalb weniger Minuten gelöst werden kann.
- Die Ebenenparameter werden in einer kombinierten Ausgleichung aufgrund der höheren Genauigkeit maßgeblich durch den TLS und weniger durch das kinematische Laserscanningsystem festgelegt, sodass eine vorherige Bestimmung auf Basis der TLS-Beobachtungen gerechtfertigt ist.

Als Beobachtungen während des Kalibrierprozesses dienen die Positionen $[t_e, t_n, t_h]^T$ sowie Orientierungswinkel ϕ, θ und ψ aus der Trajektorienschätzung der GNSS/IMU-Einheit, genauso wie die Messungen des Profillaserscanners in Form von Distanz d_s und Winkel b_s. Die zu schätzenden Parameter sind der Hebelarm $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ und die Boresight-Winkel α, β und γ. Das Kalibriermodell kann optional um die Nullpunktabweichung d_0 des Profillaserscanners erweitert werden. Allerdings muss die Nullpunktabweichung immer auf Signifikanz geprüft werden und ggf. aus dem Kalibriermodell entfernt werden.

In der Ausgleichung zur Schätzung der Kalibrierparameter wird nicht jedem einzelnen Scanpunkt des Multisensorsystems eine eigene Position und Orientierung aus der GNSS/IMU-Einheit zugewiesen, sondern allen Scanpunkten innerhalb eines Scanprofils wird die mittlere Position und Orientierung der Plattform zugeordnet. Diese Vorgehensweise lässt sich wie folgt begründen:

- Würde jedem Scanpunkt eine eigene Position und Orientierung zugeordnet, käme es im Normalgleichungssystem zu Singularitäten, da bestimmte Freiheitsgrade nicht mehr kontrollierbar sind; z. B. ist bei einem Punkt auf einer vertikalen Ebene die Höhenkomponente t_h der Position frei wählbar, kann aber durch die Beobachtung einer horizontalen Ebene im gleichen Profil fixiert werden.
- Die Vereinfachung führt zu einer deutlichen Verkleinerung des Normalgleichungssystems, wodurch die Berechnungseffizienz enorm verbessert wird (siehe auch Bemerkung zu den Ebenennormalen).
- Position und Orientierung benachbarter Punkte sind aufgrund der räumlichen und zeitlichen Nähe hoch miteinander korreliert und liefern daher keine neue, unabhängige Information.
- Durch diese Vereinfachung hervorgerufene Abweichungen in der Punktwolke sind aufgrund der hohen Profilrate des Laserscanners und der geringen Geschwindigkeit der Plattform vernachlässigbar.[5]

Eine Kalibriermessung mit dem kinematischen Laserscanningsystem dauert weniger als eine Minute und die Auswertung ist – nach einmaliger Einmessung der Ebenenanordnung mittels TLS und Bestimmung der Referenzwerte für die Ebenennormalen – vollständig automatisiert. Dadurch kann der Kalibrieransatz prinzipiell beliebig oft auf einfache Weise wiederholt werden. Die Automatisierung gestaltet sich so, dass basierend auf den einzelnen Scanprofilen des kinematischen Laserscanningsystems über eine RANSAC-Methode (Random Sample Consensus, [Fischler & Bolles, 1981]) Ebenensegmente aus den Profilen extrahiert und anschließend durch einen Matching-Prozess den korrekten Referenzebenen zugeordnet werden (siehe Abb. 5.11b). Basierend auf dieser Datenassoziation erfolgt die Aufstellung des Normalgleichungssystems und die Schätzung der

[5] Bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s und einer Profilrate von 200 Hz legt das System während eines Profils eine Wegstrecke von 5 mm zurück. Ordnet man allen Scanpunkten des Profils die Position des mittleren Scanpunktes zu, ergibt sich eine maximale Abweichung von 2,5 mm. Aufgrund der Tatsache, dass die Ebenen nur etwa 180° des Sichtfeldes des Profillaserscanners abdecken, reduziert sich die maximale Abweichung auf $< 1{,}5$ mm. Dies liegt deutlich unterhalb der Trajektoriengenauigkeit.

Kalibrierparameter vollautomatisch. Im Zuge der Ausgleichung wird darüber hinaus eine Ausreißerdetektion auf Grundlage von normierten Verbesserungen und wahlweise auch eine Varianzkomponentenschätzung für die individuellen Beobachtungsgruppen durchgeführt [Niemeier, 2008; Förstner & Wrobel, 2016]. Ferner werden die in Abschnitt 3.4 eingeführten Qualitätskriterien für Genauigkeit und Zuverlässigkeit für jeden Kalibrierdurchlauf berechnet. Diese Qualitätskriterien dienen hauptsächlich der Konfigurationsanalyse zur Ableitung der Ebenenanordnung. Dies wird im folgenden Abschnitt 5.4.2 vertieft.

Die wesentlichen Veränderungen des Kalibrierverfahrens, die zwischen den Publikationen A, B und E stattgefunden haben, betreffen die folgenden Punkte (vgl. auch Abb. 4.1, linke Spalte):

- Nutzung eines temporären Kalibrierfeldes aus 8 Holzebenen (A + B) ⇔ Nutzung eines dauerhaften Kalibrierfeldes aus 60 Sichtbetonelementen mit Sichtbetonoberfläche (E),
- statische Kalibrierung des Multisensorsystems mit mehrfachem Wechsel des Blickwinkels (A + B) ⇔ kinematische Kalibrierung des Multisensorsystems wie im normalen Gebrauch (E),
- Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel (A) ⇔ Kalibrierung des Hebelarms, der Boresight-Winkel und der Nullpunktabweichung des Laserscanners (B + E),
- keine Konfigurationsanalyse für die Ebenenanordnung (A) ⇔ Konfigurationsanalyse für die Ebenenanordnung (B) ⇔ erweiterte Konfigurationsanalyse für die Ebenenanordnung (E),
- simultane Schätzung der Kalibrierparameter und Ebenenparameter (A + B) ⇔ getrennte Schätzung der Kalibrierparameter und Ebenenparameter (E).

Die wesentlichen Unterschiede des beschriebenen, endgültigen Kalibrierverfahrens zu den Publikationen von Strübing & Neumann [2013]; Keller [2015]; Hong et al. [2017] und Hartmann et al. [2017b, 2019] sind:

- Übertragung des Ansatzes auf den Outdoor-Bereich inklusive eines dauerhaft installierten Kalibrierfeldes, das auf Grundlage einer geodätischen Konfigurationsanalyse entworfen wurde,
- Konfigurationsanalyse erfolgt nicht nur unter Berücksichtigung der Aspekte Genauigkeit und Sensitivität, sondern auch unter Beachtung der Zuverlässigkeit; in diesem Zusammenhang wird die Auswirkung von zufälligen und systematischen Abweichungen sowie von groben Fehlern analysiert,
- Erweiterung des Kalibriermodells um die Nullpunktabweichung des Laserscanners,
- kinematische Kalibrierung des Multisensorsystems im normalen Gebrauch.

5.4.2 Konfigurationsanalyse für die Ebenenanordnung

Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, hat die Anordnung der Kalibrierebenen einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Kalibrierparameter. Viele Publikationen beschäftigen sich daher mit der Bewertung der Ebenenanordnung in Form von Analysen für die erreichbare Genauigkeit der Kalibrierparameter und die Sensitivität der Ebenenanordnung gegenüber einzelnen Kalibrierparametern. Im Zuge dessen werden auch Versuche unternommen, auf Grundlage von objektiven Kriterien optimale Ebenenanordnungen abzuleiten. Bei diesen Analysen ist jedoch bisher der Aspekt der Zuverlässigkeit, d. h. die Robustheit der Kalibrierung gegenüber groben Fehlern in den Beobachtungen, kaum thematisiert worden. Im Rahmen dieser Dissertation erfolgt daher eine Erweiterung der Konfigurationsanalyse um Maße für die innere auf äußere Zuverlässigkeit der Parameterschätzung. Die Qualitätsaspekte der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Sensitivität sind seit vielen Jahrzehnten auch Gegenstand von Konfigurationsanalysen bei der geodätischen Netzausgleichung [Niemeier, 2008]. Ausgehend davon sind Konfigurationsanalysen jedoch auch auf andere Fragestellungen übertragen worden, z. B. Oberflächenapproximationen [Holst, 2015], Kalibrierung von Messarmen [Dupuis et al., 2017] und terrestrischen Laserscannern [Medić et al., 2020] oder für die Erstellung von Beobachtungsplänen

für VLBI (Very Long Baseline Interferometry) [Leek et al., 2015]. Im Rahmen dieser Dissertation erfolgt die Anwendung auf die ebenenbasierte Kalibrierung kinematischer Laserscanningsysteme.

Das übergeordnete Ziel der Kalibrierung besteht darin, die Kalibrierparameter so genau zu ermitteln, dass die Unsicherheit der Punktwolke, die vornehmlich durch die Genauigkeit der Beobachtungen festgelegt wird, nicht signifikant erhöht wird. Um eine Zielgenauigkeit für die Kalibrierparameter festzulegen, erfolgte in Publikation E eine Varianzfortpflanzung der Georeferenzierungsgleichung (siehe Gl. (3.9)). Für die Genauigkeit der einzelnen Beobachtungsgruppen wurden Erfahrungswerte und Herstellerangaben verwendet, die sich auf das fahrzeuggetragene Mobile Mapping Systems aus Abschnitt 5.1.2 beziehen (siehe Tab. 5.3). Das Ergebnis der Varianzfortpflanzung ist, dass für die Kalibrierparameter die unten aufgelisteten Standardabweichungen σ einzuhalten sind, damit sich der Helmert'sche Punktfehler eines georeferenzierten Scanpunktes – ausgedrückt durch die Standardabweichung $\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma_{x_e}^2 + \sigma_{y_e}^2 + \sigma_{z_e}^2}$ (siehe z. B. Niemeier [2008]) – in einem Radius von 50 m um das Mobile Mapping System statistisch betrachtet um maximal 1 mm vergrößert (bezogen auf eine einzelne Realisierung kann die absolute Abweichung jedoch auch größer sein). Ergänzend zu Publikation E ist an dieser Stelle auch eine Standardabweichung für die Nullpunktabweichung des Profillaserscanners angegeben, die jedoch eher theoretischen Charakter besitzt:

- Horizontale Hebelarmkomponenten: $\sigma_{\Delta x} \leq 1$ mm, $\sigma_{\Delta y} \leq 1$ mm,
- Vertikale Hebelarmkomponente: $\sigma_{\Delta z} \leq 1{,}5$ mm,
- Boresight-Winkel: $\sigma_\alpha \leq 0{,}005°$, $\sigma_\beta \leq 0{,}005°$, $\sigma_\gamma \leq 0{,}005°$,
- Nullpunktabweichung: $\sigma_{d_0} \leq 0{,}1$ mm.

Tabelle 5.3: Angenommene Standardabweichungen σ für die Beobachtungen des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems aus Abschnitt 5.1.2 für die Varianzfortpflanzung der Georeferenzierungsgleichung (siehe Gl. (3.9)).

	Lage t_e, t_n	Höhe t_h	Neigungswinkel ϕ, θ	Kurswinkel ψ	Profillaserscanner d_s	b_s
Standardabweichung σ	0,01 m	0,015 m	0,005°	0,010°	0,001 m	0,005°

Um eine Ebenenanordnung abzuleiten, die diese Genauigkeiten gewährleistet und zudem eine zuverlässige Schätzung der Kalibrierparameter ermöglicht, wurde der in Abschnitt 5.4.1 beschriebene Kalibriervorgang einer Konfigurationsanalyse unterzogen. Dazu wird die Kalibriermessung mithilfe der Software V-REP simuliert (Virtual Robot Experimentation Platform, Coppelia Robotics [2020]). V-REP stammt aus dem Bereich der Robotik und ermöglicht es, mobile Plattformen zu konstruieren und mit unterschiedlichen Sensoren wie GNSS, IMUs, Laserscanner und Kameras auszustatten. Darüber hinaus können in V-REP Umgebungen erstellt werden, durch die sich die mobile Plattform bewegen kann. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde V-REP genutzt, um das Mobile Mapping System aus Abschnitt 5.1.2 nachzubauen und verschiedene Ebenenanordnungen zu erstellen. Basierend darauf kann über ein integriertes Tool zur Trajektorienplanung der Kalibriervorgang simuliert werden. Dies ist in Abb. 5.12 illustriert. Die so generierten Beobachtungsdaten werden anschließend in eine selbst entwickelte Matlab-Toolbox importiert, in der die Schätzung der Kalibrierparameter und die Analyse der Konfiguration erfolgen. Während sich das funktionale Modell der Schätzung aus der Ebenenanordnung und der Aufnahme mit dem Mobile Mapping System ergibt, wurde das stochastische Modell entsprechend der Genauigkeiten in Tab. 5.3 aufgestellt.

Eine analytische Optimierung der Ebenenanordnung mithilfe einer Zielfunktion, die alle Qualitätskriterien für Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Sensitivität umfasst, ist schwierig. Hartmann et al. [2019] versuchen sich dieser Problemstellung mithilfe von Evolutionsstrategien zu nähern, wobei eine Optimierung auf Grundlage der Genauigkeit der Kalibrierparameter erfolgt. Die Zuverlässigkeit wird dabei nicht betrachtet. Zudem sind Randbedingungen für mögliche Ebenenanordnungen vorab zu definieren.

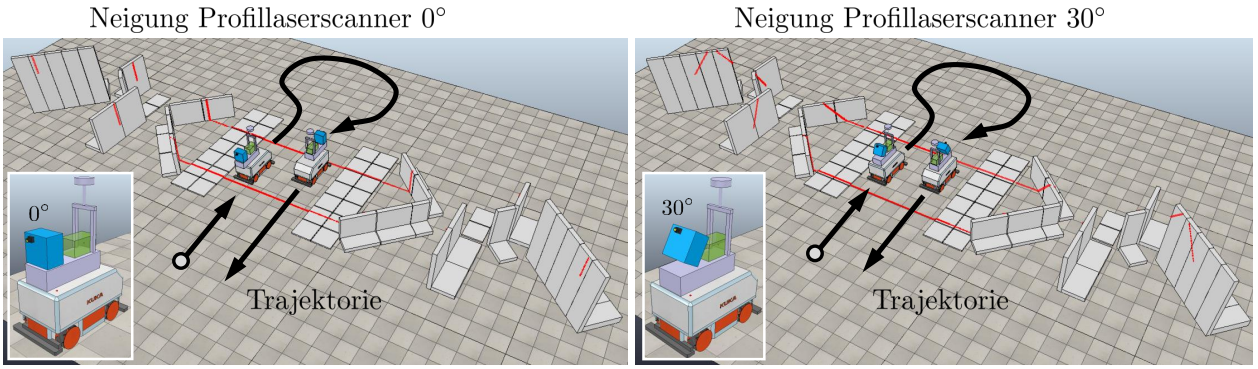


Abbildung 5.12: Nutzung von V-REP (Virtual Robot Experimentation Platform) zur Simulation der ebenenbasierten Kalibrierung. Gezeigt ist die Aufnahme der am Campus Klein-Altendorf realisierten Ebenenanordnung mit dem Mobile Mapping System. Die Aufnahmen unterscheiden sich hinsichtlich der Neigung des Profillaserscanners. **Links**: 0° Scannerneigung. **Rechts**: 30° Scannerneigung (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert).

Für die praktische Anwendung ist es meistens nicht notwendig, die optimale Ebenenanordnung abzuleiten, sondern es ist ausreichend, eine Ebenenanordnung zu finden, die eine ausreichend genaue und zuverlässige Kalibrierung des Systems ermöglicht. Im Rahmen dieser Dissertation erfolgte die Ableitung einer solchen Ebenenanordnung zur Kalibrierung des Mobile Mapping Systems aus Abschnitt 5.1.2 daher durch einen iterativen Anpassungsprozess. Dieser Anpassungsprozess startet mit einer auf Expertenwissen basierenden initialen Anordnung, die dann mithilfe der geodätischen Konfigurationsanalyse bewertet und angepasst wird. Dieser Vorgang endet, sobald eine ausreichend genaue und zuverlässige Schätzung der Kalibrierparameter vorliegt. Im Zuge der Anpassung sind einige Randbedingungen zu beachten, welche sich aus praktischen und wirtschaftlichen Gründen ergeben:

- das Kalibrierfeld soll eine maximale Fläche von 10 m $\times$ 20 m einnehmen,
- die Referenzebenen sollen aus standardisierten Tiefbau-Elementen mit Sichtbetonoberfläche bestehen, da derartige Elemente eine hohe Planarität aufweisen, kostengünstig sind und eine ausreichende Stabilität und Robustheit für eine Installation im Outdoor-Bereich besitzen,
- die Kalibrierprozedur soll einfach und schnell durchführbar sein (Dauer der Messung: $<$ 1 Minute),
- die Kalibrierparameter sollen ausreichend genau, zuverlässig, sensitiv und mit möglichst geringen Korrelationen geschätzt werden.

Im Folgenden wird die unter Beachtung dieser Randbedingungen abgeleitete Ebenenanordnung für die Kalibrierung des Mobile Mapping Systems aus Abschnitt 5.1.2 beschrieben. Die Ebenenanordnung wurde anschließend am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn realisiert (siehe Abschnitt 5.2.3). Dabei werden die Simulationsergebnisse für zwei verschiedene Fälle betrachtet. Im ersten Fall hat der Profillaserscanner eine Neigung von 0°, was dem ursprünglichen Aufbau des Systems aus Publikation B entspricht, und im zweiten Fall beträgt die Neigung des Profillaserscanners 30°, was dem finalen Aufbau des Systems aus Publikation D und E entspricht (siehe Abb. 5.12). In beiden Fällen erfolgt die kinematische Erfassung des Kalibrierfeldes in Hin- und Rückweg. Im Zuge dessen wird das Kalibrierfeld zweimal durchfahren, wobei sich die azimutale Orientierung des Multisensorsystems um $\delta\psi = 180°$ unterscheidet (siehe Abb. 5.12).

Analyse der Sensitivität

Die Sensitivität der Ebenenanordnung zeigt an, wie sich Abweichungen in den Kalibrierparametern auf den einzelnen Ebenen äußern. Abb. 5.13 zeigt diesbezüglich die Punktabstände der kinematisch erfassten Punktwolke zu den Referenzebenen, falls die Kalibrierparameter von ihren wahren Werten abweichen (Hebelarm:

$\delta\Delta x = \delta\Delta y = \delta\Delta z = 5$ mm, Boresight-Winkel: $\delta\alpha = \delta\beta = \delta\gamma = 0{,}05°$, Nullpunktabweichung: $\delta d_0 = 5$ mm). Durch eine ausreichende Sensitivität wird sichergestellt, dass die Ebenenanordnung Kalibrierabweichungen erkennen und durch Minimierung der Punktabstände zwischen der kinematisch erfassten Punktwolke und den Referenzebenen schätzen kann [Strübing & Neumann, 2013].

In Abb. 5.13 erkennt man, dass es für die einzelnen Kalibrierparameter jeweils unterschiedliche Subsets an Ebenen gibt, die sensitiv gegenüber dem jeweiligen Parameter sind. So sind zum Beispiel die auf dem Boden befindlichen Ebenen sensitiv gegenüber der vertikalen Hebelarmkomponente Δz (Fall C). Problematisch ist der Boresight-Winkel β, für den die Ebenenanordnung im Gegensatz zu den anderen Kalibrierparametern nicht sehr sensitiv ist (Fall E). Darauf wird im Zusammenhang mit den Betrachtungen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit weiter unten genauer eingegangen. Man erkennt, dass jeder Parameter ein unterschiedliches Abweichungsmuster erzeugt. Dies deutet auf eine gute Trennbarkeit der Parameter hin.

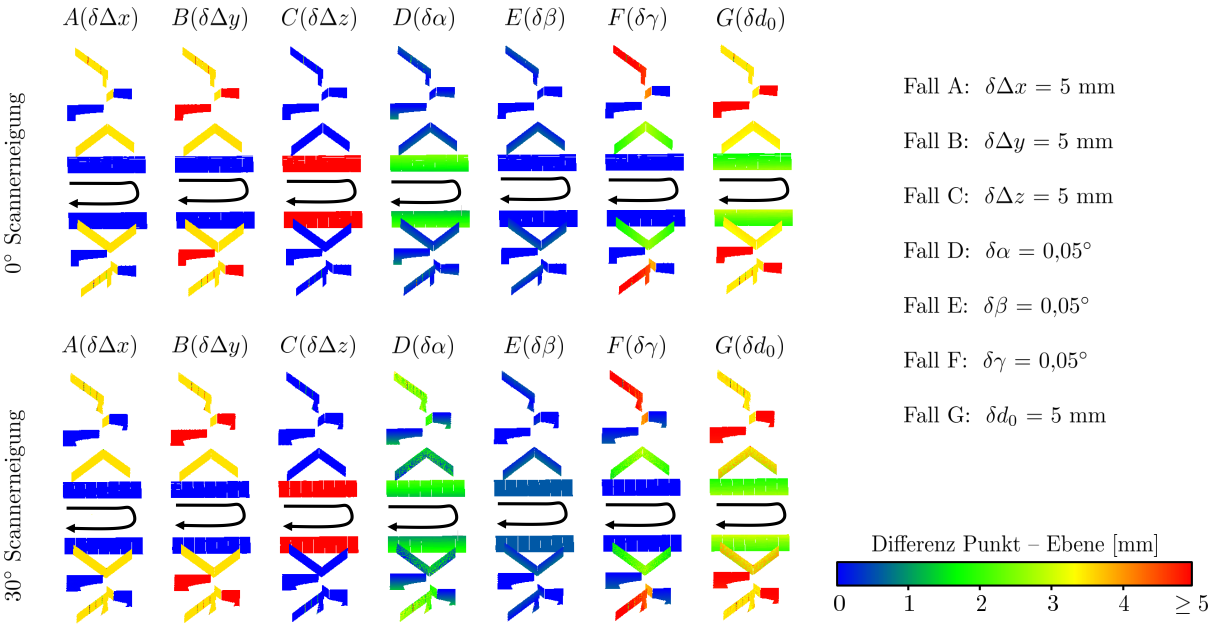


Abbildung 5.13: Sensitivität der Ebenen gegenüber den Kalibrierparametern. Die Plots zeigen die Punktabstände der kinematisch erfassten Punktwolke zu den Referenzebenen, falls die Kalibrierparameter von ihren wahren Werten abweichen. **Oben**: 0° Scannerneigung. **Unten**: 30° Scannerneigung (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert).

Interessant ist, dass sich die Abweichungsmuster für den Boresight-Winkel α für 0° Scannerneigung (obere Reihe) und 30° Scannerneigung (untere Reihe) voneinander unterscheiden (Fall D). So ist die Ebenenanordnung bei einer Scannerneigung von 30° sensitiver gegenüber dem Boresight-Winkel α als dies bei einer Scannerneigung von 0° der Fall ist, obwohl die gleiche Ebenenanordnung und die gleiche Trajektorie genutzt werden. Änderungen in der Sensitivität lassen sich z. B. auch feststellen, wenn das Mobile Mapping System auf einem Bus anstatt einem Trolley adaptiert wird. Dadurch ändert sich der Abstand zu den am Boden befindlichen Ebenen, wodurch im Falle einer Scannerneigung von 30° die Sensitivität gegenüber dem Boresight-Winkel β erhöht wird. Eine neue Situation ergibt sich auch, wenn der Laserscanner vollkommen anders auf der Plattform montiert ist, wie z. B. beim Trimble MX9 Mobile Mapping System, bei dem zwei Laserscanner in einer Butterfly-Konfiguration befestigt sind [Trimble Inc., 2020]. Dies führt zur Erkenntnis, dass sich allein durch die Architektur des Mobile Mapping Systems die Konfiguration bereits verändert, sodass eine Konfigurationsanalyse streng genommen für jeden Fall separat durchgeführt werden muss. Insofern ist die Methodik der Konfigurationsanalyse als Werkzeug zu verstehen, mithilfe dessen man für verschiedene Fälle eine Analyse der Ebenenanordnung durchführen kann. Vor diesem Hintergrund ist das am Campus Klein-Altendorf realisierte Kalibrierfeld (siehe Abb. 5.5 und Abb. 5.12) für Mobile Mapping Systeme entworfen worden, bei denen der Laserscanner nach hinten ausgerichtet ist und eine Neigung zwischen 0° und 45° aufweist (siehe z. B. auch Leica Pegasus: Two Mobile Mapping System [Leica Geosystems, 2020]).

Analyse der Genauigkeit

Zur Analyse der Genauigkeit der Kalibrierparameter wurden mehrere Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, bei denen der Kalibriervorgang jeweils 1000-mal wiederholt wurde. Im Zuge dieser Simulationen wurden zwei Fälle betrachtet. Im ersten Fall wurden rein zufällige Beobachtungsabweichungen für die Positions- und Orientierungsbestimmung der GNSS/IMU-Einheit sowie für den Profillaserscanner simuliert (siehe Tab. 5.3). Im zweiten Fall wurden neben den zufälligen Beobachtungsabweichungen auch systematische Beobachtungsabweichungen für die Positions- und Orientierungsschätzung der GNSS/IMU-Einheit simuliert. Die Betrachtung des zweiten Falles ergibt sich aus der Tatsache, dass die Trajektorienschätzung der genauigkeitsbegrenzende Faktor des Mobile Mapping Systems ist und die Trajektorienschätzung systematischen Einflüssen unterliegt. Beide Simulationen erfolgten ohne Korrelationen.

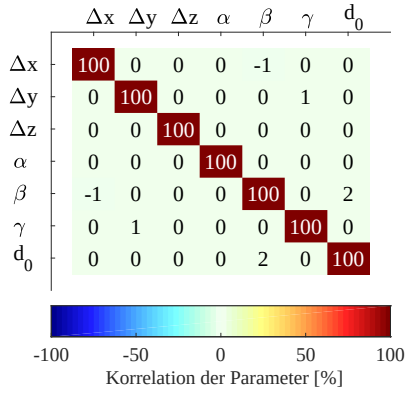


Abbildung 5.14: Parameterkorrelationen für 0° Scannerneigung.

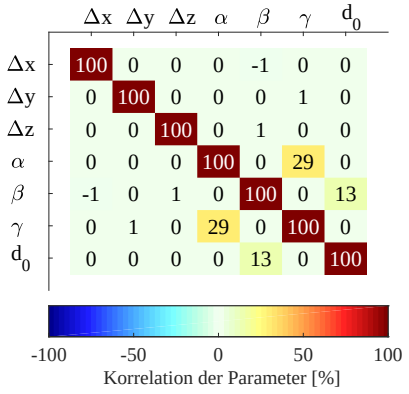


Abbildung 5.15: Parameterkorrelationen für 30° Scannerneigung.

Tabelle 5.4: Geschätzte Standardabweichungen σ der Kalibrierparameter für verschiedene Scannerneigungen.

	0°	**30°**
Δx	0,6 mm	0,6 mm
Δy	0,6 mm	0,6 mm
Δz	0,9 mm	0,9 mm
α	0,0003°	0,0004°
β	0,0007°	0,0008°
γ	0,0006°	0,0006°
d_0	0,01 mm	0,01 mm

Für den ersten Fall mit rein zufälligen Beobachtungsabweichungen ergeben sich die in Tab. 5.4 aufgelisteten Standardabweichungen für die Kalibrierparameter. Diese Standardabweichungen können auch aus der geschätzten Kovarianzmatrix $\mathbf{\Sigma}_{\hat{p}\hat{p}}$ der Parameter abgelesen werden (siehe Gl. (3.25)). Man erkennt, dass für beide Scannerneigungen von 0° bzw. 30° die geforderten Standardabweichungen für alle Kalibrierparameter theoretisch erreicht werden. Fügt man im zweiten Fall systematische Abweichungen in der Trajektorienschätzung hinzu, stellt man jedoch fest, dass sich die systematischen Abweichungen teilweise auf die Kalibrierparameter übertragen und dazu führen, dass diese systematisch zu groß oder zu klein geschätzt werden. In Abhängigkeit der Größe der Systematik können die geforderten Genauigkeiten überschritten werden. Insgesamt kann man die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen aus Publikation E wie folgt zusammenfassen:

- Bei rein zufälligen Beobachtungsabweichungen können die geforderten Standardabweichungen aller Kalibrierparameter mit einem einzelnen Kalibrierdurchlauf theoretisch erreicht werden (siehe Tab. 5.4). Dabei werden allerdings keine Korrelationen oder systematischen Abweichungen betrachtet.
- Die Genauigkeit der Hebelarms hängt im Wesentlichen von der Genauigkeit der Positionsbestimmung der mobilen Plattform ab. Daher ist die vertikale Hebelarmkomponente Δz auch ungenauer bestimmt als die beiden horizontalen Hebelarmkomponenten Δx und Δy (vgl. Tab. 5.3 und Tab. 5.4).
- Die Genauigkeit der Boresight-Winkel hängt im Wesentlichen von der Genauigkeit der Orientierungsbestimmung der mobilen Plattform ab. Daher ist der Boresight-Winkel α (ähnliche Drehachse wie der Rollwinkel) auch genauer bestimmt als der Boresight-Winkel γ (ähnliche Drehachse wie der Kurswinkel). Beim Boresight-Winkel β wirkt die geringere Sensitivität der Ebenenanordnung genauigkeitsmindernd und führt zu einer ungenaueren Schätzung (vgl. Tab. 5.3, Tab. 5.4 und Abb. 5.13).
- Systematische Positionsabweichungen in der Lage werden – falls sie in Richtung und Betrag identisch sind – durch die Messung der Ebenenanordnung im Hin- und Rückweg vollständig eliminiert und haben

keinen Einfluss auf die Kalibrierparameter. Die Messung des Kalibrierfeldes in Hin- und Rückweg wirkt diesbezüglich wie eine Art Zwei-Lagen-Messung.

- Systematische Positionsabweichungen in der Höhe übertragen sich auf die vertikale Hebelarmkomponente Δz. Zur Elimination müsste das System die Ebenen beim Rückweg kopfüber erfassen.

- Systematische Orientierungsabweichungen übertragen sich auf die Boresight-Winkel, wobei in der Regel der Boresight-Winkel betroffen ist, dessen Drehachse am ehesten mit der Drehachse des abweichungsbehafteten Orientierungswinkel übereinstimmt (z. B. Kurswinkel $\psi \rightarrow$ Boresight-Winkel γ).

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass systematische Abweichungen in der Trajektorienschätzung die Kalibrierung beeinträchtigen und ihre Genauigkeit verschlechtern können. Allerdings unterliegen derartige Systematiken einer zeitlichen Variation (z. B. aufgrund der Satellitenkonstellation bei GNSS). Wie die Ergebnisse auf Basis von empirischen Daten in Abschnitt 5.4.3 belegen, lassen sich tatsächlich zeitlich variierende Systematiken in der Schätzung der Kalibrierparameter nachweisen. Diese Systematiken weisen über die Zeit einen zunehmend zufälligen Charakter auf. Daher kann durch Mittelbildung mehrerer, zeitlich verteilter Kalibrierdurchläufe eine Reduzierung von Systematiken und damit eine Genauigkeitssteigerung erfolgen.

Ergänzend zu den geschätzten Standardabweichungen der Kalibrierparameter aus Tab. 5.4 zeigen Abb. 5.14 bzw. Abb. 5.15 die aus der geschätzten Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{p}\hat{p}}$ der Parameter berechneten Korrelationsmatrizen für beide Scannerneigungen. Die Korrelationsmatrizen bestätigen aufgrund der geringen Korrelationen eine gute Trennbarkeit der Parameter. Im Falle der Scannerneigung von 30° zeigen sich jedoch geringfügige Korrelationen, die bei der Scannerneigung von 0° nicht vorhanden sind. Dies ist wiederum auf die unterschiedliche Konfiguration zurückzuführen, die durch die Architektur des Mobile Mapping Systems hervorgerufen wird. Auch in Tab. 5.4 erkennt man bei den Boresight-Winkeln leichte Unterschiede in der Genauigkeit. Dies bestätigt die Aussage, dass die Konfigurationsanalyse in jedem Einzelfall zu prüfen ist.

Analyse der Zuverlässigkeit

Die Analyse der inneren bzw. äußeren Zuverlässigkeit verfolgt das Ziel, die Detektierbarkeit von groben Fehlern in den Beobachtungen bzw. die Auswirkung von nicht detektierbaren groben Fehlern auf die Parameter zu untersuchen. Dazu werden neben Redundanzanteilen r_i und kleinsten aufdeckbaren groben Fehlern ∇l_i auch die Einflussvektoren $\nabla \boldsymbol{p}_i$ nicht detektierbarer grober Fehler auf die Parameter berechnet.

Insgesamt kann man die Analyse der Zuverlässigkeit wie folgt zusammenfassen:

- Für die Positionsbestimmung der GNSS/IMU-Einheit und die Beobachtungen des Laserscanners ergeben sich durchweg sehr hohe Redundanzanteile r_i von nahe 1, sodass grobe Fehler sehr gut detektierbar sind. Aufgrund dessen liegt der Einfluss eines nicht detektierbaren groben Fehlers in der Position auf den Hebelarm in der Theorie bei $|\nabla \boldsymbol{p}_i| \leq 0{,}26$ mm. Die Boresight-Winkel werden nicht beeinflusst.

- Die Kontrollierbarkeit der Orientierungsbestimmung muss differenzierter betrachtet werden (siehe Abb. 5.16 und Abb. 5.17). Für den Rollwinkel ϕ und den Kurswinkel ψ ergeben sich hohe Redundanzanteile von $r_i \geq 0{,}85$. Folglich lassen sich grobe Fehler relativ schnell aufdecken ($|\nabla \phi_i| \geq 0{,}025°$ bzw. $|\nabla \psi_i| \geq 0{,}05°$). Aufgrund dessen liegt der Einfluss eines nicht detektierbaren groben Fehlers im Roll- oder Kurswinkel auf die Boresight-Winkel in der Theorie bei $|\nabla \boldsymbol{p}_i| \leq 0{,}00018°$. Im Gegensatz dazu ist der Nickwinkel θ mit Redundanzanteilen $r_i < 0{,}3$ deutlich schlechter kontrolliert, wodurch grobe Fehler auch erst später aufgedeckt werden können. Die schlechtere Kontrollierbarkeit steht in Verbindung mit der schlechteren Sensitivität des Kalibrierfeldes für den Boresight-Winkel β, da beide Winkel nahezu um die gleiche Achse drehen. Der theoretische Einfluss eines nicht detektierten Nickwinkelfehlers auf die Boresight-Winkel ist jedoch mit $|\nabla \boldsymbol{p}_i| \leq 0{,}00031°$ klein, sodass die kleinen Redundanzanteile tolerierbar sind. Der Hebelarm wird nicht von groben Fehlern in den Orientierungswinkeln beeinflusst.

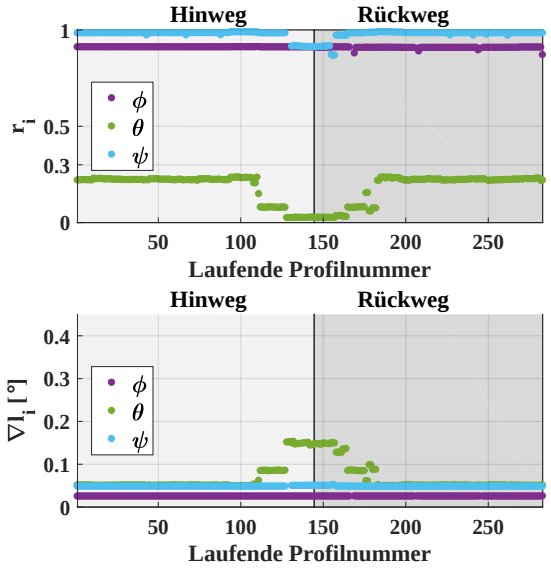


Abbildung 5.16: Redundanzanteile r_i und kleinste aufdeckbare grobe Fehler ∇l_i für die Rollwinkel ϕ, Nickwinkel θ und Kurswinkel ψ der GNSS/IMU-Einheit für Hin- und Rückweg im Kalibrierfeld (Scannerneigung: 0°).

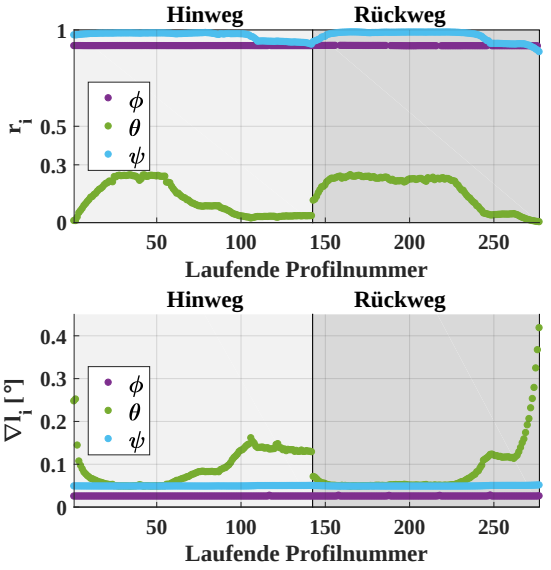


Abbildung 5.17: Redundanzanteile r_i und kleinste aufdeckbare grobe Fehler ∇l_i für die Rollwinkel ϕ, Nickwinkel θ und Kurswinkel ψ der GNSS/IMU-Einheit für Hin- und Rückweg im Kalibrierfeld (Scannerneigung: 30°).

Insgesamt ergibt sich eine ausreichend gute Kontrollierbarkeit im Kalibrierfeld. Eine gute Kontrolle ist insbesondere für die Positions- und Kurswinkelbestimmung wichtig, da diese Trajektorienparameter von GNSS-Beobachtungen gestützt werden, während die Neigungswinkel im Wesentlichen aus den IMU-Beobachtungen abgeleitet werden. Anhand der Redundanzanteile und kleinsten aufdeckbaren groben Fehler in den Abb. 5.16 und Abb. 5.17 ist jedoch wieder erkennbar, dass es in Abhängigkeit der Neigung des Laserscanners zu Unterschieden kommt, die aus der veränderten Konfiguration resultieren, sodass die Zuverlässigkeitsanalyse streng genommen auch fallbezogen erfolgen muss.

5.4.3 Anwendung auf das fahrzeuggetragene Mobile Mapping System

Um die praktische Einsatzfähigkeit des Kalibrierfeldes empirisch nachzuweisen, erfolgten in Publikation E im Abstand von fünf Tagen umfangreiche Kalibriermessungen. Dazu wurde die Ebenenanordnung am ersten Tag mittels TLS (Leica ScanStation P50) eingemessen und über lokale Verknüpfungspunkte und das Referenzfestpunktfeld hochgenau georeferenziert. Im Anschluss daran wurde das Mobile Mapping System aus Abschnitt 5.1.2 auf einem Trolley adaptiert und insgesamt 98 Kalibrierdurchläufe durchgeführt, die sich auf vier unabhängige und zeitlich getrennte Blöcke verteilen (siehe Abb. 5.18 und Tab. 5.5). Aufgrund der dauerhaften und stabilen Installation des Kalibrierfeldes konnte am zweiten Tag auf eine erneute Einmessung des Kalibrierfeldes verzichtet werden. Die Stabilität des Kalibrierfeldes ist jedoch regelmäßig zu überprüfen.

Gemäß der Konfigurationsanalyse aus Abschnitt 5.4.2 können vor allem systematische Abweichungen in der Trajektorienschätzung einen kritischen Einfluss auf das Kalibrierergebnis haben. Während systematische Abweichungen in der Lage – falls sie in Richtung und Betrag identisch sind – durch den Messvorgang eliminiert werden, übertragen sich systematische Höhenabweichungen und solche in den Orientierungswinkeln auf die Kalibrierparameter. Das Ziel der zeitlichen Verteilung der 98 Kalibrierdurchläufe besteht darin, unterschiedliche systematische Abweichungen in der Trajektorienschätzung – vor allem hervorgerufen durch eine Veränderung der Satellitenkonstellation bei GNSS – abzudecken und ihren Einfluss auf die Genauigkeit der Kalibrierung festzustellen. Unter der Annahme zeitlich variierender Systematiken lässt sich der Einfluss der Systematiken durch Mittelbildung von Kalibrierergebnissen zu unterschiedlichen Zeitpunkten reduzieren.



Abbildung 5.18: Kalibrierdurchlauf im ebenenbasierten Kalibrierfeld mit dem Mobile Mapping System.

Tabelle 5.5: Zeitplan der 98 Kalibrierdurchläufe im ebenenbasierten Kalibrierfeld (Juli & August 2019).

Block	Datum	GPS-Zeit	Durchläufe
1	31.07.2019	13:40 – 13:55	14
2	05.08.2019	09:05 – 09:25	21
3	05.08.2019	10:30 – 10:50	31
4	05.08.2019	11:45 – 12:10	32

Die Ergebnisse der 98 Kalibrierdurchläufe sind in Abb. 5.19 in Form von Histogrammen und in Abb. 5.20 zeitlich geordnet abgebildet. In Abb. 5.20 trennen die schwarzen vertikalen Linien die vier Kalibrierblöcke voneinander ab (siehe Tab. 5.5). Ergänzend listet Tab. 5.6 die Mittelwerte der 98 Realisierungen. Ferner zeigt Tab. 5.6 die im Rahmen der Konfigurationsanalyse geforderte Standardabweichung σ (siehe Abschnitt 5.4.2), die empirisch ermittelte Standardabweichung $\hat{\sigma}$ für eine Realisierung sowie die daraus über Varianzfortpflanzung ermittelte Standardabweichung $\bar{\sigma}_{15}$ für den Mittelwert aus 15 Realisierungen. Die empirisch ermittelte Standardabweichung $\hat{\sigma}$ für eine Realisierung ergibt sich aus der Standardabweichung der Histogramme in Abb. 5.19. Beim Mittelwert für 15 Realisierungen wird unter Vernachlässigung von Korrelationen vereinfacht eine Genauigkeitssteigerung mit $\sqrt{n}$ angenommen (n = Anzahl der Realisierungen).

Die empirischen Standardabweichungen der horizontalen Hebelarmkomponenten Δx und Δy liegen bei $\hat{\sigma}_{\Delta x} = 0{,}9$ mm bzw. $\hat{\sigma}_{\Delta y} = 1{,}1$ mm und erreichen damit prinzipiell die geforderte Standardabweichung von $\sigma_{\Delta x,\Delta y} \leq 1$ mm. Die Standardabweichung der vertikalen Hebelarmkomponente Δz ist mit $\hat{\sigma}_{\Delta z} = 4{,}5$ mm deutlich größer. In Abb. 5.20 erkennt man, dass die vertikale Hebelarmkomponente Δz von starken, zeitlich variierenden Systematiken durchzogen ist, die zu einer erhöhten Standardabweichung führen. Bei den horizontalen Hebelarmkomponenten Δx und Δy ist dies nur in deutlich abgeschwächter Form der Fall. Die Genauigkeit des Hebelarms wird laut Simulation maßgeblich durch die Positionsgenauigkeit der Trajektorie bestimmt. Insgesamt ist die Höhe bei Systemen auf Basis einer GNSS/IMU-Integration ungenauer bestimmt als die Lage [Groves, 2013; Teunissen & Montenbruck, 2017], wobei insbesondere systematische Abweichungen und grobe Fehler die Genauigkeit beeinträchtigen. Während grobe Fehler sowohl in der Lage als auch in der Höhe durch die Ebenenanordnung sehr gut detektiert werden können (siehe Abschnitt 5.4.2), werden systematische Positionsabweichungen nur in der Lage durch die Messanordnung reduziert (Zwei-Lagen-Messung). Systematische Höhenabweichungen übertragen sich hauptsächlich auf die vertikale Hebelarmkomponente Δz. Folglich lassen sich die empirisch erhaltenen Ergebnisse sehr gut mit theoretischen Überlegungen und den Resultaten der Konfigurationsanalyse in Einklang bringen. Um die geforderte Standardabweichung von $\sigma_{\Delta z} \leq 1{,}5$ mm für die vertikale Hebelarmkomponente einzuhalten, lassen sich zeitlich verteilte Kalibrierergebnisse mitteln. Diese aus theoretischen Überlegungen resultierende Strategie wird durch Abb. 5.20 gerechtfertigt, da die Kalibrierergebnisse für Δz über die Zeit mit unterschiedlichem Vorzeichen und Betrag um den Mittelwert streuen und sich im zugehörigen Histogramm in Abb. 5.19 insgesamt eine Häufigkeitsverteilung ergibt, die an eine Normalverteilung erinnert. Folglich erhalten die Systematiken in der Höhe mit der Zeit einen immer zufälligeren Charakter, sodass durch Mittelbildung eine Steigerung der Genauigkeit erreicht werden kann.

Bei den Boresight-Winkel ist der Winkel α mit $\hat{\sigma}_\alpha = 0{,}0012°$ am präzisesten bestimmt und hält die geforderte Standardabweichung von $\sigma_\alpha \leq 0{,}005°$ ein. Am unpräzisesten ist der Boresight-Winkel β mit $\hat{\sigma}_\beta = 0{,}0188°$. Dieser Wert liegt deutlich über der geforderten Standardabweichung von $\sigma_\beta \leq 0{,}005°$. Eine Ursache für die im Gegensatz zum Boresight-Winkel α erhöhte Standardabweichung liegt in der geringeren Sensitivität des Kalibrierfeldes für den Boresight-Winkel β. Prinzipiell sind auch systematische Einflüsse aus dem Nickwinkel denkbar (siehe Abschnitt 5.4.2). Betrachtet man jedoch die zeitliche Abfolge für den geschätzten Boresight-Winkel β in Abb. 5.20, erscheinen die Werte eher zufällig als systematisch. Auch das zugehörige Histogramm in Abb. 5.19 erinnert – wie bei der vertikalen Hebelarmkomponente Δz – sehr stark an eine Normalverteilung.

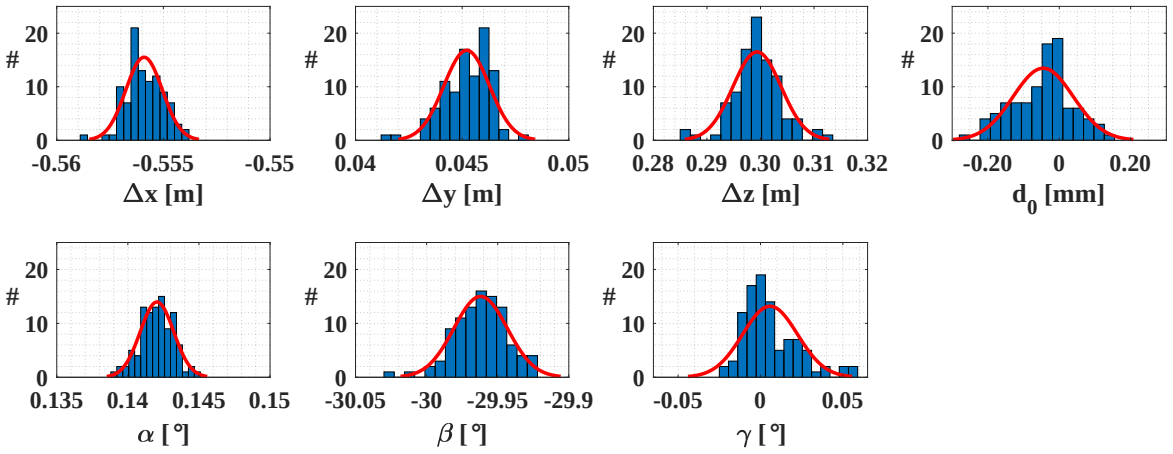


Abbildung 5.19: Häufigkeitsverteilung der 98 Kalibrierdurchläufe für den Hebelarm $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$, die Boresight-Winkel α, β und γ sowie die Nullpunktabweichung d_0 (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert).

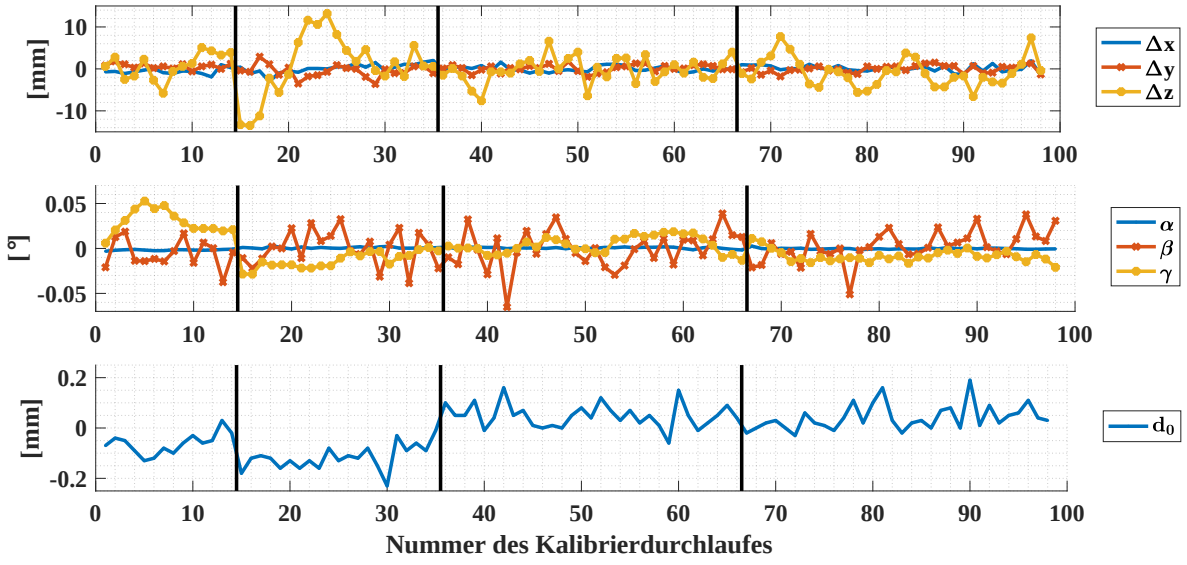


Abbildung 5.20: Abfolge der 98 Kalibrierdurchläufe für den Hebelarm $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$, die Boresight-Winkel α, β und γ sowie die Nullpunktabweichung d_0. Die Linien trennen die Blöcke (Abbildung aus Heinz et al. [2020c]).

Tabelle 5.6: Mittelwerte und Standardabweichungen der 98 Kalibrierdurchläufe. Die empirische Standardabweichung $\hat{\sigma}$ ergibt sich aus der Streuung der Histogramme in Abb. 5.19. Über Varianzfortpflanzung folgt $\bar{\sigma}_{15} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}$.

Parameter	Δx	Δy	Δz	α	β	γ	d_0
Mittelwert	-0,5559 m	0,0452 m	0,2994 m	0,1420°	-29,9620°	0,0058°	-0,05 mm
Zielgenauigkeit (σ)	1,0 mm	1,0 mm	1,5 mm	0,0050°	0,0050°	0,0050°	0,1 mm
1 Durchlauf ($\hat{\sigma}$)	0,9 mm	1,1 mm	4,5 mm	0,0012°	0,0188°	0,0166°	0,08 mm
15 Durchläufe ($\bar{\sigma}_{15}$)	0,2 mm	0,3 mm	1,2 mm	0,0003°	0,0049°	0,0043°	0,02 mm

Folglich kann auch beim Boresight-Winkel β eine Genauigkeitssteigerung durch Mittelbildung erfolgen. Beim Boresight-Winkel γ erhält man eine empirische Standardabweichung von $\hat{\sigma}_\gamma = 0{,}0166°$, die ebenfalls über der geforderten Standardabweichung von $\sigma_\gamma \leq 0{,}005°$ liegt. Die zeitliche Abfolge der Kalibrierwerte in Abb. 5.20 zeigt deutliche Systematiken, die besonders zu Beginn sehr groß sind. Aufgrund dessen ist das zugehörige Histogramm in Abb. 5.19 auch erst dann näherungsweise normalverteilt, wenn man die Kalibrierwerte aus dem ersten Block entfernt. Trotzdem lässt sich auch hier durch Mittelbildung eine Genauigkeitssteigerung erreichen. Als Ursache für die Abweichungen im Boresight-Winkel γ lassen sich systematische Abweichungen in der Kurswinkelbestimmung anführen (siehe Abschnitt 5.4.2). Die Genauigkeit der Boresight-Winkel wird laut Simulation maßgeblich durch die Genauigkeit der Orientierungsbestimmung festgelegt. Während Roll- und Nickwinkel sehr genau aus den Messungen der Akzelerometer abgeleitet werden können, ist die Kurswinkelbestimmung sehr viel anfälliger für systematische Abweichungen, weil die Genauigkeit stark vom anfänglichen Alignment abhängt und in der Bewegung durch fehleranfällige GNSS-Messungen gestützt wird.

Hinsichtlich der Nullpunktabweichung d_0 weichen mit einer Ausnahme alle Werte maximal ± 0,2 mm vom Mittelwert ab. Der berechnete Mittelwert von -0,05 mm liegt innerhalb der Auflösung der Distanzmessung des Z+F Profiler 9012A und wird auch vom Messrauschen deutlich überstiegen (vgl. Abschnitt 5.3.2). Daher kann dieser Parameter im vorliegenden Fall vernachlässigt werden. Die Schätzung der Nullpunktabweichung muss stets kritisch hinterfragt werden. Insbesondere bei einem high-end Instrument wie dem Z+F Profiler 9012A fällt die Nullpunktabweichung im Vergleich zu den sonstigen Abweichungsquellen des Mobile Mapping Systems kaum ins Gewicht, sodass die Schätzung dieses Parameters eher aus theoretischer als aus praktischer Sicht interessant ist. Anders verhält es sich bei Laserscannern, die dem low-cost Bereich zuzuordnen sind (z. B. der Hokuyo UTM-30LX-EW des tragbaren low-cost Laserscanningsystems aus Abschnitt 5.1.1). Hier ist die Schätzung der Nullpunktabweichung deutlich interessanter, weil mit höheren Werten gerechnet werden muss, die im gesamten Unsicherheitsbudget des Systems einen signifikanten Anteil haben können.

Die Ergebnisse zeigen, dass die geforderten Standardabweichungen der Kalibrierparameter ($\sigma_{\Delta x,\Delta y} \leq 1$ mm, $\sigma_{\Delta z} \leq 1{,}5$ mm und $\sigma_{\alpha,\beta,\gamma} \leq 0{,}005°$) für die horizontalen Hebelarmkomponenten Δx und Δy sowie den Boresight-Winkel α in der Praxis bereits auf Basis eines einzelnen Kalibrierdurchlaufes erreicht werden. Aufgrund eingeschränkter Sensitivität des Kalibrierfeldes und systematischer Abweichungen in der Trajektorienschätzung – vor allem Höhe und Kurswinkel – können die geforderten Standardabweichungen für die vertikale Hebelarmkomponente Δz sowie die beiden Boresight-Winkel β und γ nicht auf Basis eines einzelnen Kalibrierdurchlaufes erreicht werden. Aufgrund der zufälligen Verteilung der Kalibrierergebnisse zeitlich verteilter Durchläufe kann jedoch durch Mittelbildung der Ergebnisse eine Genauigkeitssteigerung erreicht werden, sodass auch für die drei letztgenannten Parameter eine ausreichend genaue Kalibrierung erfolgen kann. Wie die Abschätzungen aus Tab. 5.6 zeigen, würden im vorliegenden Fall unter Nutzung des Varianzfortpflanzungsgesetztes für unkorrelierte Beobachtungen 15 Realisierungen dafür ausreichen. Da einzelne Kalibrierdurchläufe jedoch nicht vollkommen unkorreliert sind – insbesondere dann nicht, wenn sie zeitlich direkt aufeinanderfolgen – wird für praktische Kalibriermessungen empfohlen, 15 Kalibriermessungen durchzuführen und dies nach einer Pause von 1 bis 3 Stunden zu wiederholen, damit sich eine zeitliche Variation der Systematiken ergibt. Zur Steigerung der statistischen Sicherheit sind weitere Wiederholungen denkbar. Grundsätzlich fällt auf, dass die empirische Streuung der Kalibrierparameter höher ist als die theoretische Streuung aus der Simulation (siehe Abschnitt 5.4.2). Dies könnte auf vernachlässigte Korrelationen zwischen den Beobachtungen zurückgeführt werden oder auf weitere Einflussfaktoren, die in der Simulation nicht abgebildet sind. Hier bietet sich Raum für weiterführende Forschungsarbeiten.

Eine weitere Möglichkeit, den Einfluss der Trajektoriengenauigkeit auf das Kalibrierergebnis zu reduzieren, besteht theoretisch auch darin, die Trägerplattform während des Kalibriervorganges mit externen Sensoren – wie z. B. einem Tachymeter oder einem Lasertracker – anzumessen, wie dies bei einigen kinematischen Laserscanningsystemen im Indoor-Bereich der Fall ist (siehe z. B. Keller [2015] oder Hartmann et al. [2017b, 2019]). Dies könnte kinematisch oder statisch erfolgen, wobei die statische Variante zu bevorzugen wäre. Der besseren Genauigkeit der Trajektorie stehen jedoch eine Reihe von praktischen Nachteilen gegenüber. Durch den Einsatz externer Sensorik würde die Kalibrierung aufwändiger, da die Ausrüstung vor Ort aufgebaut und zunächst im übergeordneten Referenzfestpunktfeld georeferenziert werden müsste. Im Falle der statischen Kalibrierung müsste das Multisensorsystem zur Erzeugung unterschiedlicher Blickwinkel auf die Kalibrierebenen zudem mehrfach umgesetzt werden. Dies würde ebenfalls mehr Aufwand bedeuten. Darüber

hinaus wäre es notwendig, das Multisensorsystem mit Reflektoren auszustatten. Während zur Positionsbestimmung ein Reflektor ausreichend ist, müssten für die Orientierungsbestimmung insgesamt drei Reflektoren angebracht werden. Ähnlich wie bei den sensorbasierten Kalibrieransätzen aus Abschnitt 2.2 sähe man sich hier wiederum mit der Problematik der geringen Abmessungen des Multisensorsystems und der daraus resultierenden Ungenauigkeit der Orientierungsbestimmung aus Punktpaaren konfrontiert. Ferner müsste sichergestellt werden, dass die Reflektoren das Bezugssystem der GNSS/IMU-Einheit repräsentieren, z. B. müsste der Bezug des GNSS-Antennenreferenzpunktes und des Reflektormittelpunktes bekannt sein. Die genannten Nachteile führen dazu, dass die Möglichkeit einer externen Georeferenzierung während der Kalibrierung im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter verfolgt wurde.

5.4.4 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

Die wesentlichen Erkenntnisse der Abschnitte 5.4.1 bis 5.4.3 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Basierend auf der Arbeit von Strübing & Neumann [2013] wurde ein ebenenbasiertes Kalibrierverfahren für kinematische Laserscanningsysteme im Outdoor-Bereich entwickelt, das die Bestimmung des Hebelarms $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ sowie der Boresight-Winkel α, β und γ zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit ermöglicht. Außerdem ist es möglich, die Nullpunktabweichung d_0 des Profillaserscanners mitzuschätzen. Methodisch basiert der Ansatz darauf, dass die Punktwolken des kinematische Laserscanningsystems durch Anpassung der Kalibrierparameter mit georeferenzierten TLS-Referenzpunktwolken in Überdeckung gebracht werden. Als Bindeglied zwischen den beiden Punktwolken fungieren hierbei die Ebenenparameter.

- Die Anordnung der Referenzebenen wurde mithilfe einer Konfigurationsanalyse abgeleitet, um sicherzustellen, dass sich die Kalibrierparameter ausreichend genau, zuverlässig, sensitiv und mit möglichst geringen Korrelationen bestimmen lassen. Im Zuge dessen wurden der Einfluss von zufälligen und systematischen Abweichungen sowie von groben Fehlern in den Beobachtungen auf die Parameterschätzung analysiert. Ein wesentlicher Beitrag liegt darin, dass die ebenenbasierte Kalibrierung auch unter dem Aspekt der Zuverlässigkeit betrachtet wird, was in bisherigen Arbeiten kaum der Fall war.

- Aufgrund der unterschiedlichen Architektur kinematischer Laserscanningsysteme muss die Konfigurationsanalyse streng genommen für jedes System individuell erfolgen, weil sich das funktionale Modell der Parameterschätzung verändert. Insofern ist die Konfigurationsanalyse als allgemeines Werkzeug zu verstehen. In dieser Dissertation wurde für das Multisensorsystem aus Abschnitt 5.1.2 eine passende Ebenenanordnung abgeleitet und als dauerhaft installiertes Kalibrierfeld realisiert. Die zugehörige Kalibrierprozedur dauert – abgesehen von der einmaligen Einmessung des Kalibrierfeldes – weniger als eine Minute. Die Auswertung ist automatisiert und nimmt ebenfalls nur wenige Minuten in Anspruch, sodass sich die Kalibrierung einfach und beliebig häufig wiederholen lässt.

- Die Konfigurationsanalyse hat darüber hinaus gezeigt, dass die Genauigkeit der Kalibrierparameter neben der Ebenenanordnung auch maßgeblich von der Genauigkeit der Trajektorie abhängt. Dabei lassen sich zufällige Abweichungen durch die hohe Redundanz in der Ausgleichung in ausreichendem Maße reduzieren, grobe Fehler lassen sich durch Ausreißertests eliminieren. Problematisch sind systematische Abweichungen, die teilweise zu verzerrten Schätzungen der Kalibrierparameter führen können.

- Gemäß Konfigurationsanalyse lassen sich die geforderten Standardabweichungen für die Kalibrierparameter ($\sigma_{\Delta x}$, $\sigma_{\Delta y} \leq 1$ mm, $\sigma_{\Delta z} \leq 1{,}5$ mm, σ_α, σ_β, $\sigma_\gamma \leq 0{,}005°$, $\sigma_{d_0} \leq 0{,}1$ mm) bei rein zufälligen Beobachtungsabweichungen bereits durch einen einzigen Kalibrierdurchlauf erreichen. Empirische Untersuchungen bestätigen, dass dies für die Parameter Δx, Δy, α und d_0 auch in der Praxis der Fall ist. Aufgrund von systematischen Beobachtungsabweichungen und teilweise schwacher Sensitivität gilt dies für die Parameter Δz, β und γ jedoch nicht. Es zeigt sich jedoch, dass man durch wiederholte und zeitlich verteilte Kalibrierdurchläufe eine Variation der vor allem durch GNSS hervorgerufenen Systematiken bzw. eine Abmilderung der Sensitivitätsproblematik erreichen kann, die im Mittel zu einer Genauigkeitssteigerung führt. Gemäß den Tests sind in der Praxis 15 Kalibrierdurchläufe ausreichend, um die Zielgenauigkeiten für die Parameter Δz, β und γ zu erreichen.

5.5 Evaluierungsansätze für kinematische Laserscanningsysteme

Die dritte in Abschnitt 1.2 formulierte Zielsetzung der vorliegenden Dissertation besteht darin, eine dauerhaft installierte und allgemein zugängliche Evaluierungseinrichtung für kinematische Laserscanningsysteme aufzubauen, die punkt- und flächenbasierte Evaluierungsstrategien implementiert. Diese Evaluierungseinrichtung soll neben einer empirischen Evaluierung des Gesamtsystems auch Teile des Systems analysieren können (z. B. Lage- und Höhengenauigkeit oder Feststellung von Kalibrierabweichungen). Zu diesem Zweck wurden in den Publikationen A, B und D zunächst sowohl punkt- als auch flächenbasierte Evaluierungsstrategien erprobt. Auf Grundlage der dabei gewonnenen Erkenntnisse erfolgte dann in Publikation E der Aufbau der Evaluierungseinrichtung am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn in Form eines Referenzfestpunktfeldes und von TLS-Referenzpunktwolken (siehe Abschnitt 5.2).

In den Abschnitten 5.5.1 und 5.5.2 werden die wichtigsten Ergebnisse der Publikationen A, B, D und E hinsichtlich der punkt- und flächenbasierten Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme zusammengefasst. Die dritte Evaluierungsstrategie für kinematische Laserscanningsysteme besteht in der Nutzung von parameterbasierten Ansätzen, die im Rahmen dieser Dissertation im Zuge einer Straßenzustandserfassung anwendungsbezogen erprobt werden (Abschnitt 5.5.3). In Kapitel 6 werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Evaluierungseinrichtung aus Abschnitt 5.2 um parameterbasierte Ansätze erweitert werden kann.

5.5.1 Punktbasierte Verfahren

Punktbasierte Evaluierungen basierend auf der Nutzung von künstlichen Zielzeichen werden in der vorliegenden Dissertation in den Publikationen D und E verwendet. In Publikation D erfolgte eine punktbasierte Evaluierung im Zuge einer Straßenzustandserfassung an der Autobahn A44n (siehe auch Abschnitt 5.5.3). Bei der Erfassung der Straßenoberfläche ist besonders die Höhengenauigkeit bedeutend, weshalb sich die punktbasierte Evaluierung auf die Höhenkomponente fokussierte. Entlang der Autobahn A44n wurden insgesamt acht mittels Nivellement eingemessene Kontrollpunkte mit standardisierten Leica Tilt & Turn Targets signalisiert (Abb. 5.21 und 5.22). Von den acht Kontrollpunkten befanden sich vier an der westlichen Fahrbahn und vier an der östlichen Fahrbahn. Jeder Kontrollpunkt wurde mit dem Mobile Mapping System aus Abschnitt 5.1.2, das auf einem Fahrzeug adaptiert wurde, zweimal erfasst. Insgesamt ergeben sich so $2 \times 8 = 16$ Scans der Kontrollpunkte. Anschließend erfolgten eine Schätzung der Mittelpunkte der Zielzeichen aus den Punktwolken und der Vergleich mit den Referenzwerten.

Bei GNSS-gestützten Multisensorsystemen weisen die Punktwolken nach der Überführung in verebnete Gebrauchskoordinaten ellipsoidische Höhen auf (hier bezogen auf das GRS80-Ellipsoid). Die nivellierten Höhen der Kontrollpunkte liegen aber in Form von physikalischen Normalhöhen im DHHN16 vor. Zur Verknüpfung der Höhensysteme wurden Undulationen aus dem Quasigeoidmodell GCG16 verwendet, die bis 1000 m Höhe eine Standardabweichung von $\sigma \leq 10$ mm aufweisen [Riecken & Kurtenbach, 2017; Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2017]. Da die Genauigkeit der Quasigeoidundulationen im Untersuchungsgebiet jedoch nicht bekannt ist, wurde basierend auf dem Vergleich von physikalischen und ellipsoidischen Höhenunterschieden aus Nivellements und statischen GNSS-Messungen zwischen fünf Stationen entlang der Autobahn eine lineare bzw. stückweise lineare Neigungskorrektur für das GCG16-Modell bestimmt. Begünstigend ist, dass die Autobahn entlang des Gradienten der Quasigeoidundulation verläuft (siehe Abb. 5.21). Ein potentieller Offset des GCG16-Modells wurde bereinigt, indem die ellipsoidische Höhe der GNSS-Referenzstation am Punkt P_3 durch Addition der Quasigeoidundulation und der bekannten Normalhöhe des Punktes bestimmt wurde. Details sind Publikation D zu entnehmen.

Die Ergebnisse der Evaluierung sind in Abb. 5.22 gezeigt. Man erkennt, dass die Abweichungen bei Nutzung des GCG16-Modells ohne Neigungskorrektur mit Ausnahme der beiden nördlichsten Punkte 220 und 213 alle im Bereich von -5 mm bis +10 mm liegen und mehr oder weniger um Null streuen. Auffällig bei den Punkten 220 und 213 ist, dass sie trotz der großen Abweichungen im Rahmen der Wiederholungsmessungen präzise bestimmt werden. Dies wird auch dadurch bestätigt, dass die aus den Doppelmessungen abgeleitete Standardabweichung nur $\sigma = 4{,}7$ mm beträgt, während der RMS-Wert mit 14,1 mm dreimal so groß ist. Dies deutet darauf hin, dass die erhöhten Abweichungen vermutlich nicht durch das Mobile Mapping System

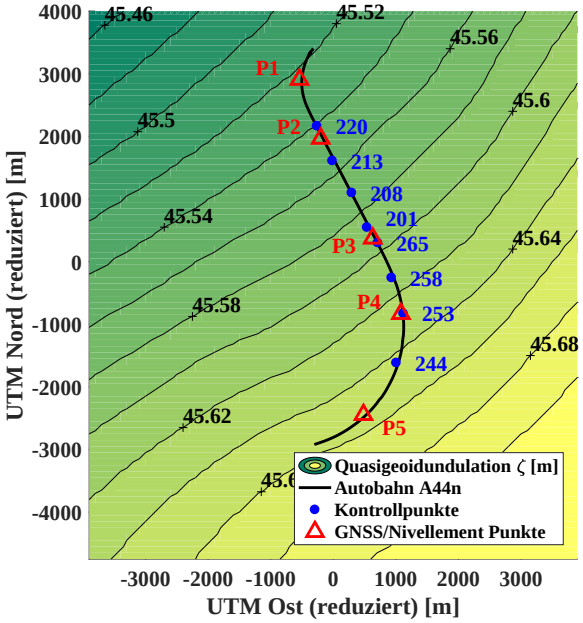


Abbildung 5.21: Verteilung der Kontrollpunkte (blau) zur Evaluierung der Höhenkomponente des Mobile Mapping Systems und GNSS/Nivellement Punkte (rot) zur Bestimmung einer Neigungskorrektion für die Quasigeoidundulation des GCG16-Modells entlang der A44n (Abbildung aus Heinz et al. [2020a], modifiziert).

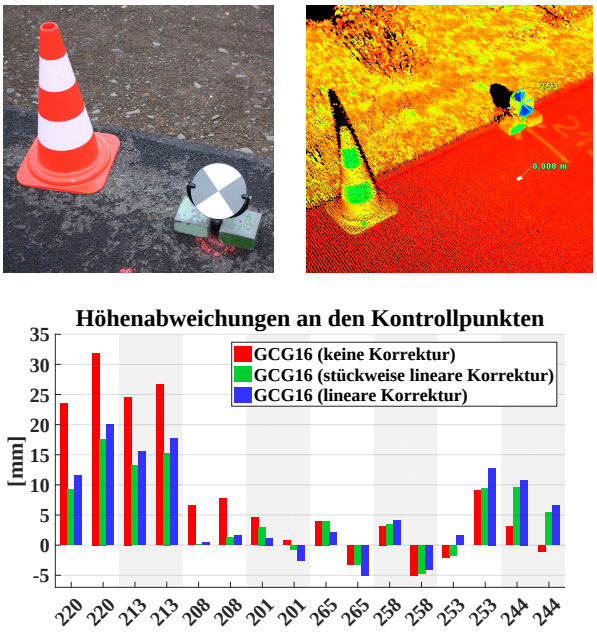


Abbildung 5.22: Signalisierung und Aufnahme eines Kontrollpunktes mit dem Mobile Mapping System (**oben**). Ergebnisse der punktbasierten Evaluierung der Höhenkomponente mit und ohne Korrekturfunktion für das Quasigeoidmodell GCG16 (**unten**) (Abbildung aus Heinz et al. [2020a], modifiziert).

hervorgerufen werden. Als Ursachen kommen eine mangelhafte Adaption der Zielzeichen, eine Setzung der Punkte zwischen Nivellement und Mobile Mapping Messung oder Abweichungen im GCG16-Modell in Frage. Dass zumindest Teile der Abweichung auf das GCG16-Modell zurückgeführt werden können, bestätigt sich, wenn man die Neigungskorrektur an das GCG16-Modell anbringt. Durch diese Anpassung werden die RMS-Werte auf 9,7 mm (lineare Korrektur) bzw. 8,2 mm (stückweise lineare Korrektur) reduziert. Zusätzlich zur Höhe wurde auch die Lage an den Kontrollpunkten evaluiert. Allerdings standen für die Lage nur Referenzwerte mit cm-Genauigkeit zur Verfügung. Basierend darauf wurden für die Ost- bzw. Nordrichtung RMS-Werte von < 18 mm und Standardabweichungen aus Doppelmessungen von $\sigma \leq 12$ mm bestimmt. Es ist anzunehmen, dass die Lagegenauigkeit des Systems besser ist. Dies wird auch durch die Untersuchungsergebnisse in der Evaluierungseinrichtung am Campus Klein-Altendorf belegt (siehe Abb. 5.23).

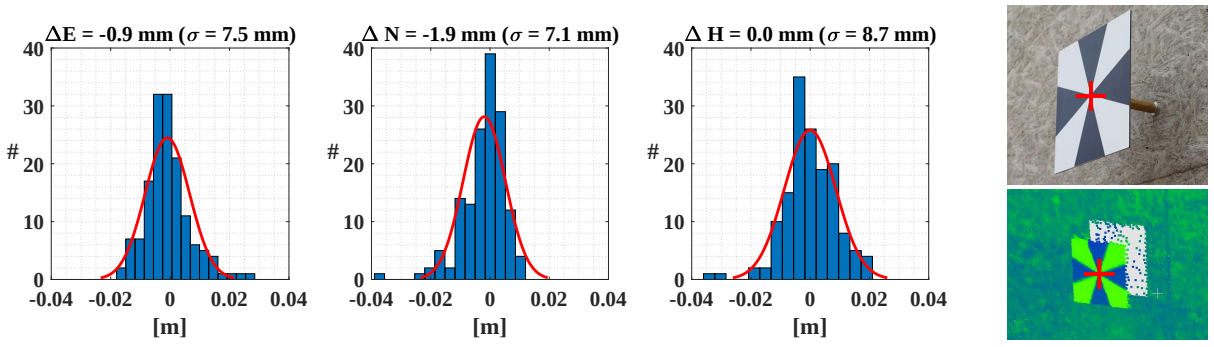


Abbildung 5.23: Ergebnisse der punktbasierten Evaluierung des Mobile Mapping Systems am Campus Klein-Altendorf für Ost-, Nord- und Höhenkomponente basierend auf 148 Scans von Kontrollpunkten aus dem Referenzfestpunktfeld (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert).

Als zweite punktbasierte Evaluierung des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems aus Abschnitt 5.1.2 wurden in Publikation E umfangreiche Testmessungen in der Evaluierungseinrichtung am Campus Klein-Altendorf durchgeführt (siehe Abschnitt 5.2.1). Dazu wurden mehrere Pfeiler und Gebäudepunkte mit BOTA8 Targets signalisiert und an unterschiedlichen Tagen insgesamt 148 Scans der Zielzeichen durchgeführt. Abb. 5.23 zeigt die Histogramme der Abweichungen zu den Referenzwerten getrennt für Ost-, Nord und Höhenkomponente. Die Histogramme weisen in erster Näherung die Form einer Normalverteilung auf mit Mittelwerten < 2 mm und empirischen Standardabweichungen $\sigma < 9$ mm. Die Unterschiede zwischen Lage und Höhe sind marginal und belegen eine hohe Genauigkeit des Mobile Mapping Systems sowie eine hohe Qualität des Referenzfestpunktfeldes. Bemerkenswert ist, dass die Höhengenauigkeit von 8,7 mm (RMS) sehr gut mit der an der Autobahn bestimmten Genauigkeit von 8,2 mm (RMS) übereinstimmt, die man bei Nutzung der stückweise linearen Neigungskorrektur für das GCG16-Modell erhält (siehe Abb. 5.22).

Anhand der Ergebnisse der punktbasierten Evaluierungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die punktbasierte Evaluierung auf Grundlage von künstlichen Zielzeichen ist geeignet, um die Genauigkeit eines kinematischen Laserscanningsystems zu evaluieren. Dabei ist insbesondere von Vorteil, dass aufgrund der eindeutigen Punktdefinition eine klare Trennung von Lage und Höhe sowie die Bestimmung von Präzision und Richtigkeit möglich ist.
- Nachteilig an künstlichen Zielzeichen ist, dass eine Analyse einzelner Systemkomponenten (z. B. Trajektorienschätzung oder Systemkalibrierung) nicht ohne Weiteres möglich ist. Darüber hinaus muss man sich aufgrund der begrenzten Größe der Zielzeichen deutlich langsamer an ihnen vorbeibewegen als dies im normalen Gebrauch der Systeme der Fall ist, damit in Abhängigkeit von Profilrate, Profilauflösung und Geschwindigkeit eine ausreichende Punktauflösung auf dem Zielzeichen erreicht wird. Daher sind BOTA8 Targets (30 cm $\times$ 30 cm) auch deutlich besser für eine Evaluierung geeignet als Leica Tilt & Turn Targets ($\varnothing = 15$ cm).
- Ein weiterer Nachteil der Kontrollpunkte besteht darin, dass immer nur kleine Ausschnitte der Punktwolke betrachtet werden und eine Rückführung festgestellter Abweichungen auf ihre Ursachen nur eingeschränkt möglich ist. Wie Abschnitt 5.5.2 verdeutlicht, können flächenbasierte Verfahren auf Grundlage von Punktwolkenvergleichen diesbezüglich unterstützend wirken.
- Die Genauigkeit des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems aus Abschnitt 5.1.2 kann für alle drei Komponenten Ost, Nord und Höhe mit einem RMS von < 10 mm spezifiziert werden, wobei die Höhengenauigkeit anhand von zwei unabhängigen Kampagnen bestätigt wurde.
- Durch Nutzung des Quasigeoidmodells GCG16 lassen sich mit dem fahrzeuggetragenen Mobile Mapping System aus Abschnitt 5.1.2 auch Normalhöhen mit einem RMS von < 10 mm aus den Punktwolken bestimmen. Um diese Genauigkeiten zu erreichen, muss aber die Qualität des Quasigeoidmodells GCG16 im Anwendungsgebiet analysiert und ggf. durch Korrekturfunktionen verbessert werden.
- Aufgrund der Höhengenauigkeit des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems aus Abschnitt 5.1.2 könnten potentielle Straßensetzungen im Bereich weniger Zentimeter signifikant detektiert werden.

5.5.2 Flächenbasierte Verfahren

Ergänzend zur in Abschnitt 5.5.1 diskutierten punktbasierten Evaluierung erfolgte in den Publikationen B, D und E mithilfe von Punktwolkenvergleichen auch eine flächenbasierte Evaluierung des Mobile Mapping Systems aus Abschnitt 5.1.2. Für das tragbare low-cost Laserscanningsystem aus Abschnitt 5.1.1 wurde dies entsprechend in Publikation A durchgeführt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen beschrieben.

In Publikation A werden die Punktwolken des tragbaren low-cost Laserscanningsystems am Campus Klein-Altendorf und am Poppelsdorfer Schloss in Bonn gegen TLS-Referenzpunktwolken evaluiert. Dies erfolgt auf

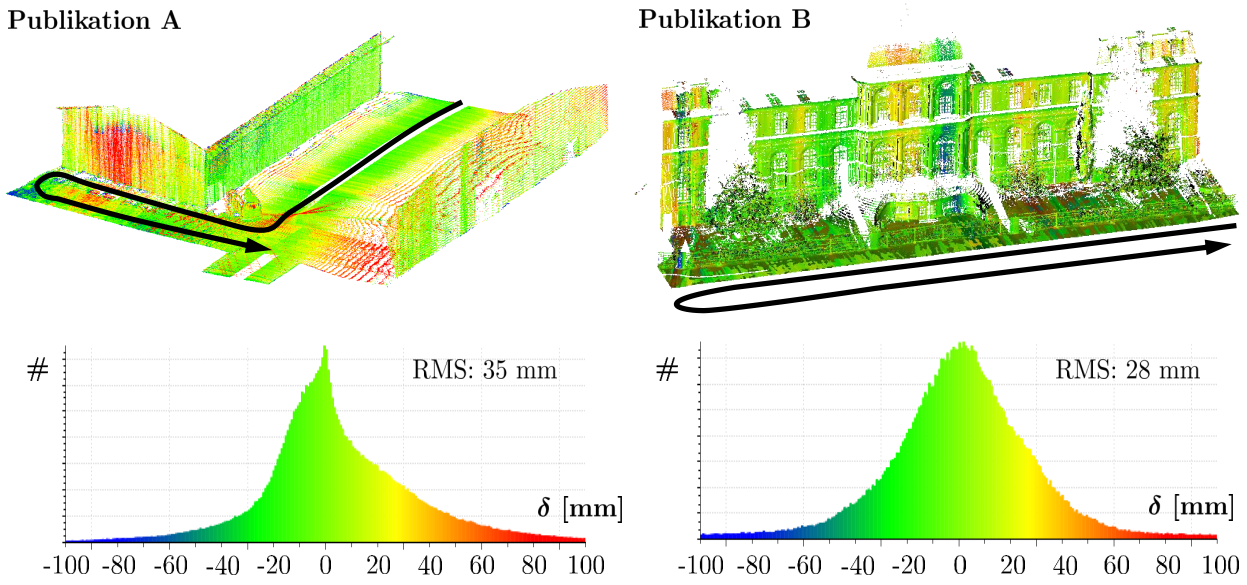


Abbildung 5.24: Beispielhafte Punktwolkenvergleiche aus den Publikationen A (tragbares low-cost Laserscanningsystem, Campus Klein-Altendorf, C2M-Vergleich) und B (fahrzeuggetragenes Mobile Mapping System, Poppelsdorfer Schloss in Bonn, M3C2-Vergleich). Die schwarzen Pfeile zeigen die Trajektorien der Multisensorsysteme während der Objektaufnahme an (Abbildungen aus Heinz et al. [2015, 2017], modifiziert).

Basis von Punktwolkenvergleichen mithilfe der Algorithmen C2C (Cloud-to-Cloud) sowie C2M (Cloud-to-Mesh) in der Software CloudCompare [Cloud Compare, 2020]. Dabei werden RMS-Werte zwischen 35 mm und 85 mm erreicht. In Publikation B werden zwei Punktwolken des Poppelsdorfer Schlosses, die mit dem fahrzeuggetragenen Mobile Mapping System in entgegengesetzter Bewegungsrichtung aufgenommen wurden, mithilfe des M3C2-Algorithmus (Multiscale-Model-to-Model-Cloud) [Lague et al., 2013] in CloudCompare verglichen. Dabei ergibt sich ein RMS-Wert von 28 mm. Abb. 5.24 zeigt für beide Fälle beispielhafte Resultate. Die Untersuchungen in den Publikationen A und B verdeutlichen, dass es viele Gestaltungsmöglichkeiten bei der Anwendung von Punktwolkenvergleichen gibt. Dies betrifft einerseits den gewählten Algorithmus und andererseits die darin einzustellenden Parameter. Zudem können neben der Software CloudCompare auch andere Softwarepakete, wie z. B. Geomagic Studio/Control (3DSystems) oder 3DReshaper (Hexagon Metrology), genutzt werden. Vor diesem Hintergrund ist es für Anwender sehr schwierig, die richtige Wahl zu treffen. Eine ausführliche Diskussion zu diesem Thema findet sich in Holst et al. [2017].

Unabhängig von der gewählten Methode lassen sich die Ergebnisse eines Punktwolkenvergleiches entweder als Histogramm oder als Falschfarbendarstellung visualisieren, bei denen die Punktwolken mit den berechneten Differenzen eingefärbt werden. Beide Darstellungsformen können jedoch irreführend sein. So suggeriert das rechte Histogramm in Abb. 5.24 eine erwartungstreue Punktwolke, deren Abweichungen zufällig und normalverteilt sind. Die zugehörige Falschfarbendarstellung deckt jedoch auf, dass es Bereiche in der Punktwolke gibt, an denen erhöhte Abweichungen systematisch auftreten. Diese systematischen Abweichungen sind im vorliegenden Fall mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf die Trajektorienschätzung zurückzuführen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Trajektorienschätzung des Mobile Mapping Systems in Publikation B noch mithilfe eines stark vereinfachten Kalman-Filters ohne fortgeschrittene funktionale und stochastische Modellierung durchgeführt wurde. Aus diesem Grund sind die Abweichungen im Vergleich zu den späteren Evaluierungen in den Publikationen D und E erhöht. Auf der anderen Seite können aber auch die Falschfarbendarstellungen einen falschen Eindruck vermitteln. So ist in der linken Punktwolke in Abb. 5.24 die Längsseite des Gebäudes nahezu vollständig grün, während die Giebelseite durch gelbe und rote Farbgebung erhöhte Abweichungen anzeigt. Dies könnte erneut auf lokale Ungenauigkeiten in der Trajektorie zurückgeführt werden, andererseits könnte es sich aber auch um eine orthogonal zur Giebelwand wirkende Systematik in der Positionsbestimmung handeln, für die die Längsseite des Gebäudes nicht sensitiv ist. Daraus folgt, dass bei der Wahl des Evaluierungsobjektes und der Art und Weise, wie es mit dem mobilen System erfasst

wird, auf eine ausreichende Sensitivität der Szene hinsichtlich verschiedener Abweichungsquellen geachtet werden muss. Außerdem muss stets eine gemeinsame Betrachtung der Histogramme und der Falschfarbendarstellungen erfolgen.

Punktwolkenvergleiche wie in Abb. 5.24 geben zwar einen ersten Einblick in das Genauigkeitspotential kinematischer Laserscanningsysteme, allerdings ergeben sich in der Praxis eine Reihe von Problemen:

- Hinsichtlich der verfügbaren Softwarepakete und Algorithmen gibt es vielfältige Möglichkeiten Punktwolkenvergleiche durchzuführen. Dies macht es für den Anwender schwierig, die richtige Wahl zu treffen und das Werkzeug korrekt einzusetzen.
- Die Ergebnisse von Punktwolkenvergleichen in Form von Histogrammen und Falschfarbendarstellungen können irreführend sein und bedürfen stets einer korrekten Interpretation und kritischen Würdigung.
- Werden das Objekt und/oder die Art der Erfassung ungünstig gewählt, kann es aufgrund fehlender Sensitivität gegenüber bestimmten Abweichungsquellen zu einer zu optimistischen Abschätzung der Genauigkeit kommen. Im schlimmsten Fall bleiben vorhandene Abweichungen unentdeckt.
- Anders als bei den punktbasierten Evaluierungen ist eine Quantifizierung von Lage- und Höhengenauigkeit schwieriger, da die Abweichungen im 3D-Raum berechnet werden.
- Rückschlüsse auf Abweichungsquellen sind schwierig, da sich bestimmte Abweichungen sehr ähnlich auf die Punktwolke auswirken (z. B. Orientierungsschätzung und Boresight-Kalibrierung).

Die oben genannten Probleme erschweren es, mithilfe von Punktwolkenvergleichen zielgerichtete Evaluierungen durchzuführen. Anhand von zwei Beispielen aus den Publikationen D und E soll im Folgenden jedoch aufgezeigt werden, dass sich Punktwolkenvergleiche dennoch für zielgerichtete Evaluierungen von Multisensorsystemen eignen, wenn sie richtig eingesetzt werden.

Evaluierung der Höhengenauigkeit mithilfe von Punktwolkenvergleichen

In Publikation D wird die Anwendbarkeit des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems für die Straßenzustandserfassung in einem Testgebiet auf der Autobahn A44n erprobt. Wie bereits erwähnt, ist hierbei die Höhengenauigkeit von besonderer Bedeutung. Zur Evaluierung der Höhengenauigkeit wurden auf der Autobahn zwölf zufällig ausgewählte Abschnitte der Straßenoberfläche aus den Punktwolken extrahiert. Von diesen zwölf Abschnitten lagen sechs Abschnitte auf der westlichen Fahrbahn und sechs Abschnitte auf der östlichen Fahrbahn. Jeder Abschnitt hatte eine Länge von 50 m und wurde zweimal mit dem Mobile Mapping System erfasst. Die Punktwolken aus den Wiederholungsmessungen wurden einem C2M-Vergleich in der Software CloudCompare unterzogen. Diese Evaluierungsstrategie wird auch in Barber et al. [2008] angewendet. Abb. 5.25 zeigt beispielhaft das Ergebnis von einem der zwölf Abschnitte. Tab. 5.7 fasst die Mittelwerte und die RMS-Werte der Histogramme, die aus dem C2M-Vergleich resultieren, zusammen.

Die C2M-Differenzen zwischen den beiden Punktwolken werden orthogonal zur Oberfläche berechnet, die bei der Straße nach oben gerichtet ist. Aufgrund der geringen Längs- und Querneigung der Straße spielen Lageabweichungen keine Rolle, sodass die C2M-Differenzen die reine Höhengenauigkeit anzeigen. Anhand der Ergebnisse in Abb. 5.25 und Tab. 5.7 erkennt man, dass die Wiederholgenauigkeit zu großen Teilen von sich verändernden systematischen Abweichungen bestimmt wird, die dazu führen, dass die gesamte Straßenoberfläche bei der zweiten Messung stets ein paar Millimeter über oder unter der ersten Messung liegt. Im Durchschnitt ergibt sich jedoch eine Abweichung von 0,7 mm. Dies belegt, dass die Genauigkeit eines kinematischen Multisensorsystems zwar im Wesentlichen durch Systematiken bestimmt wird, diese jedoch räumlich und zeitlich so variieren, dass sie im statistischen Mittel einen zunehmend zufälligen Charakter erhalten. Im Durchschnitt erhält man einen RMS-Wert von 7,8 mm, der relativ gut zu den punktbasierten Evaluierungsergebnissen aus Abschnitt 5.5.1 passt. Es sei jedoch angemerkt, dass bei der Untersuchung an der Autobahn A44n keine Referenzpunktwolke verfügbar war, sodass die hier gezeigten Ergebnisse nur

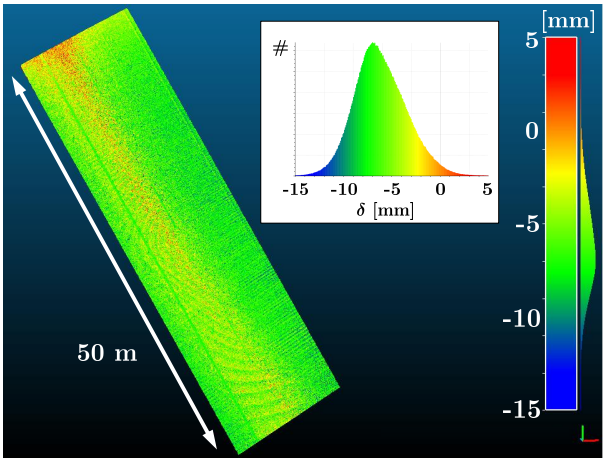


Abbildung 5.25: C2M-Punktwolkenvergleich zwischen zwei Scans der Fahrbahn an der Autobahn A44n. Die Scans korrespondieren zu Abschnitt 10 in Tab. 5.7 (Abbildung aus Heinz et al. [2020a], modifiziert).

Tabelle 5.7: Mittelwerte und RMS-Werte der C2M-Punktwolkenvergleiche der Fahrbahn an der Autobahn A44n. Abschnitt 10 korrespondiert zu Abb. 5.25.

Abschnitt	Mittelwert	RMS
1	-6,8 mm	9,4 mm
2	6,5 mm	8,6 mm
3	-10,7 mm	11,5 mm
4	0,5 mm	2,8 mm
5	0,5 mm	3,1 mm
6	12,5 mm	12,7 mm
7	-6,9 mm	7,6 mm
8	7,4 mm	7,9 mm
9	-1,3 mm	3,2 mm
10	**-6,1 mm**	**6,8 mm**
11	-11,6 mm	12,3 mm
12	7,9 mm	8,3 mm
∅	0,7 mm	7,8 mm

die Wiederholgenauigkeit widerspiegeln. Dies ist jedoch für die Überwachung von Straßensetzungen in zwei Epochen vollkommen ausreichend. Basierend darauf kann die Aussage aus Abschnitt 5.5.1, dass potentielle Höhenveränderungen der Straßenoberfläche im Bereich weniger Zentimeter signifikant detektierbar sind, auch anhand von Punktwolkenvergleichen bestätigt werden. Insgesamt lässt sich auch eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der punktbasierten und flächenbasierten Evaluierung feststellen.

Evaluierung der Systemkalibrierung mithilfe von Punktwolkenvergleichen

In Publikation E werden zur Evaluierung des Mobile Mapping Systems die TLS-Referenzpunktwolken der Evaluierungseinrichtung am Campus Klein-Altendorf eingesetzt (siehe Abschnitt 5.2.2). Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf der Analyse von Kalibrierabweichungen. Zu diesem Zweck werden Punktwolken in zwei unterschiedlichen Bereichen A und B des Campus Klein-Altendorf betrachtet. Bei Bereich A handelt es sich um eine Sichtbetonwand einer Maschinenhalle und bei Bereich B um eine Straßenszene mit Gebäuden. Im Bereich A wird das Mobile Mapping System parallel an der Sichtbetonwand vorbeibewegt, im Bereich B wird die Straßenszene mit einem Richtungswechsel von 90° durchfahren. Abb. 5.26 zeigt die resultierenden Punktwolken dieser beiden Aufnahmen, zudem sind die Trajektorien durch weiße Pfeile kenntlich gemacht. Die Punktwolken werden mit zwei unterschiedlichen Sets an Kalibrierparametern berechnet, zum einen mit einer Näherungskalibrierung, die aus dem Konstruktionsplan des Mobile Mapping Systems resultiert, und zum anderen mithilfe der ebenenbasierten Kalibrierung (siehe Abschnitt 5.4.3). Der größte Unterschied zwischen diesen beiden Kalibrierungen besteht im Boresight-Winkel α. Dieser unterscheidet sich um $\delta\alpha = 0{,}1420°$.

Der Boresight-Winkel α dreht beim vorliegenden Mobile Mapping System um eine ähnliche Achse wie der Rollwinkel ϕ. Daher führen Abweichungen im Boresight-Winkel α und im Rollwinkel ϕ zu ähnlichen Abweichungen in der Punktwolke. Dies wird in Abb. 5.26 deutlich, wo das Mobile Mapping System im Bereich A parallel zur Sichtbetonwand der Maschinenhalle bewegt wurde. Die mithilfe eines M3C2-Vergleichs in CloudCompare berechneten Differenzen zur TLS-Referenzpunktwolke weisen bei Nutzung der Näherungskalibrierung (A1) auf eine Verkippung der Punktwolke hin, da die Differenzen von unten nach oben auf -40 mm anwachsen. Prinzipiell könnte eine derartige Verkippung auf einen Fehler in der Rollwinkelbestimmung zurückgeführt werden. Im vorliegenden Fall ist aber der fehlerhafte Boresight-Winkel α ursächlich für die Verkippung, da die Verkippung bei Anwendung der ebenenbasierten Kalibrierung (A2) verschwindet. Die Aufnahmesituation im Bereich A kann auch zur Selbstkalibrierung des Systems genutzt werden, indem man die Wand zweimal in entgegengesetzter Richtung erfasst und die beiden Punktwolken auf eine gegenseitige

Verkippung prüft (siehe Keller & Sternberg [2013]; Sternberg et al. [2013]; Keller [2015] und Li et al. [2019]). Auch der Bereich B ist sensitiv für die Abweichung im Boresight-Winkel α, die sich deutlich am Dach des Hauses zeigt. Darüber hinaus zeigt die Simulation von Kalibrierabweichungen, dass der Bereich B auch sensitiv gegenüber Abweichungen in den Hebelarmkomponenten Δy und Δz sowie den Boresight-Winkeln α und γ ist. Bereich A ist sensitiv für den Boresight-Winkel α und die Hebelarmkomponente Δy. Eine Sensitivität gegenüber der Hebelarmkomponente Δx ließe sich erreichen, indem man sich schräg zur Wand bewegt.

In Publikation E wurden die Bereiche A und B mehrfach erfasst und die M3C2-Punktwolkenvergleiche wiederholt durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass bei Nutzung der ebenenbasierten Kalibrierung alle RMS-Werte < 10 mm liegen und größenordnungsmäßig relativ gut mit den Ergebnissen der punktbasierten Evaluierung des Mobile Mapping Systems am Campus Klein-Altendorf übereinstimmen, welche für die einzelnen Koordinatenrichtungen erhalten werden (siehe Abb. 5.23). Eigentlich wäre zu erwarten, dass die RMS-Werte des M3C2-Vergleichs größer sein müssten, weil die Berechnung der Differenzen nicht komponentenweise, sondern im 3D-Raum erfolgt. Dass dies nicht so ist, ist ein Beleg dafür, dass die Ergebnisse von Punktwolkenvergleichen häufig zu optimistisch ausfallen, weil die Berechnung nicht sensitiv gegenüber allen Abweichungen ist. So verwundert es nicht, dass die RMS-Werte des M3C2-Vergleichs im Bereich A an der Maschinenhalle tendenziell sogar noch etwas kleiner sind als die RMS-Werte im Bereich B, da Bereich B aufgrund der größeren Heterogenität hinsichtlich Position und Orientierung der Oberflächen und aufgrund des Orientierungswechsels in der Trajektorie prinzipiell sensitiver auf Abweichungen reagiert.

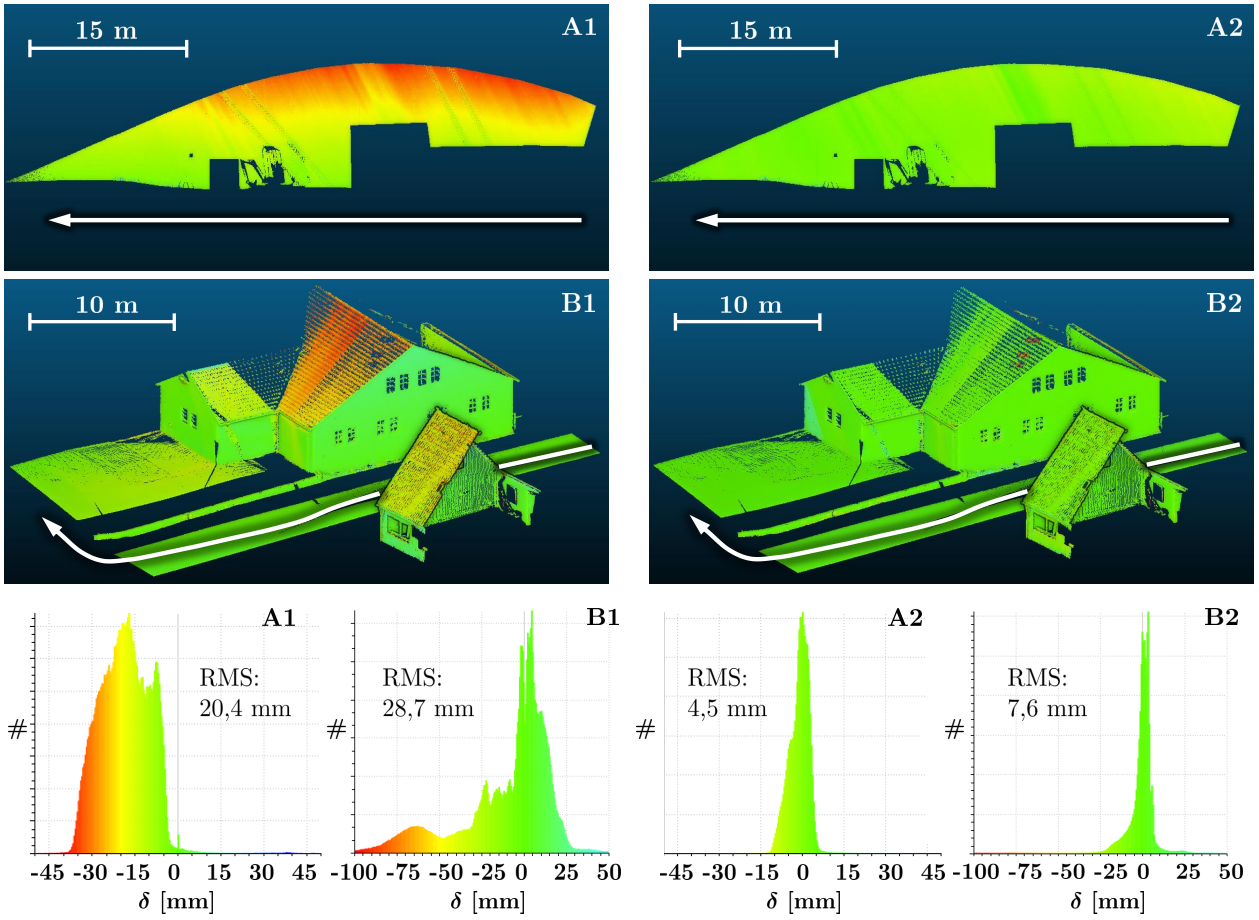


Abbildung 5.26: M3C2-Punktwolkenvergleiche zwischen einer TLS-Referenzpunktwolke und Punktwolken des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems. Die Punktwolken des mobilen Systems wurden mithilfe einer Näherungskalibrierung aus der Konstruktionszeichnung des Systems (A1 und B1) und mithilfe der ebenenbasierten Kalibrierung aus Abschnitt 5.4.3 (A2 und B2) berechnet (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert).

Die Beispiele auf der Autobahn A44n und am Campus Klein-Altendorf zeigen, dass Punktwolkenvergleiche trotz ihrer Nachteile ganz gezielt zu Evaluierungszwecken eingesetzt werden können. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die aufgenommene Szene für die festzustellenden Abweichungen sensitiv ist. In diesem Zusammenhang ließe sich ähnlich wie bei der ebenenbasierten Kalibrierung eine Konfigurationsanalyse durchführen, um einen Fundus an Szenen abzuleiten, der sensitiv gegenüber allen Abweichungsquellen ist. Problematisch bleibt die Trennung von Systemkomponenten, die zu ähnlichen Abweichungen führen. Dazu wurde das Beispiel des Boresight-Winkels α und des Rollwinkels ϕ der Plattform angeführt. Eine mögliche Strategie zur Lösung dieser Problematik liegt wiederum in der Ausnutzung der zeitlichen und räumlichen Variation der systematischen Abweichungen in der Trajektorienschätzung, ähnlich wie dies im ebenenbasierten Kalibrierfeld der Fall ist (siehe Abschnitt 5.4.3). Führt man eine Aufnahme wie im Bereich A in Abb. 5.26 wiederholt durch, würde sich unter der getroffenen Annahme zeitlich variierender Systematiken eine Rollwinkelabweichung im statistischen Mittel über alle Realisierungen abschwächen, während eine Kalibrierabweichung zeitlich konstant immer in gleicher Weise vorhanden wäre.

5.5.3 Parameterbasierte Verfahren

Bei den parameterbasierten Evaluierungsstrategien rückt die Punktwolke in den Hintergrund und der Fokus wird auf das Endprodukt der Messkampagne verlagert. Bei den aus Punktwolken abzuleitenden Parametern gibt es eine große Abhängigkeit von der Anwendung, weshalb die parameterbasierte Strategie im Rahmen der vorliegenden Dissertation auch anwendungsbezogen erprobt wurde. Dazu wurden in Publikation D an der Autobahn A44n Zustandsparameter für die Ebenheit von Straßenoberflächen in Querrichtung aus den Punktwolken abgeleitet und evaluiert. Bei den Zustandsparametern handelt es sich um die Querneigung der Straße (QN), die Spurrinnentiefe (SPT) sowie die horizontbezogene Spurrinnentiefe, die als fiktive Wassertiefe (SPH) bezeichnet wird (siehe Abb. 5.27). Für eine detaillierte Beschreibung zur Definition und Berechnung dieser Zustandsgrößen sei auf Publikation D verwiesen. Insgesamt wird die Ebenheitsmessung von Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung mithilfe berührungsloser Messverfahren seitens der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) durch eine technische Prüfvorschrift geregelt [FGSV, 2009]. Publikation D orientiert sich an dieser Vorschrift.

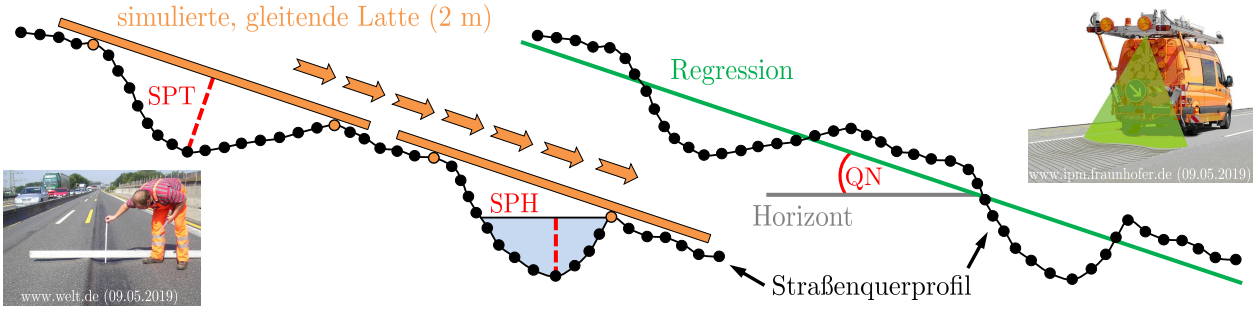


Abbildung 5.27: Aus Straßenquerprofilen abgeleitete Zustandsparameter: Querneigung QN, Spurrinnentiefe SPT und fiktive Wassertiefe SPH (Abbildung aus Heinz et al. [2020a], modifiziert; siehe auch FGSV [2009]).

Der erfasste Abschnitt der Autobahn A44n ist etwa 6 km lang und besteht aus einer westlichen und östlichen Fahrbahn, die beide aus jeweils drei Fahrspuren bestehen. Beide Fahrbahnen wurden zweimal mit dem Mobile Mapping System erfasst. Die durchschnittliche Geschwindigkeit während der Messung betrug 50 km/h, sodass die Erfassung einer Fahrbahn knapp acht Minuten dauerte. Die Messungen erfolgten im Dezember 2017, als die Autobahn noch nicht für den Verkehr geöffnet war. Abb. 5.28 (links) zeigt die aus der 1. Messung abgeleitete Querneigung QN der östlichen Fahrbahn der Autobahn A44n als Funktion der Bogenlänge der Autobahn. Die Berechnung der Querneigung basiert auf einer Regression durch die georeferenzierten Scanprofile des Mobile Mapping Systems (siehe Abb. 5.27). Anhand der Querneigung lassen sich die verschiedenen Trassierungselemente der Autobahn (Kreisbogen, Klothoide und Gerade) klar erkennen. Anhand der Richtlinien der FGSV für die Anlage von Autobahnen [FGSV, 2008] können die ermittelten Querneigungswerte auf Plausibilität geprüft werden. Beispielweise erhält man für den Kreisbogen im Süden

der Autobahn (grün) eine Querneigung von rund 4 %. Der Radius des Kreisbogens wurde aus der Trajektorie mit rund 1950 m bestimmt. Gemäß FGSV [2008] wird für Kreisbögen mit einem Radius von 1950 m auf Autobahnen mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 130 km/h eine Querneigung von 4 % vorgeschrieben. Auch die Querneigung von im Mittel 2,5 % auf der Geraden (blau) entspricht den Vorgaben der FGSV. Neben einer Plausibilitätskontrolle kann die Wiederholgenauigkeit der Querneigungsbestimmung aus dem Vergleich von 1. und 2. Messung festgestellt werden. Abb. 5.28 (rechts) zeigt die Querneigungsdifferenzen δQN zwischen 1. und 2. Messung für beide Fahrbahnen als Funktion der Bogenlänge der Autobahn und in Form von Histogrammen. Der Mittelwert beträgt für beide Vergleiche -0,001 %, allerdings lässt sich bei der östlichen Fahrbahn eine klare Drift erkennen, die bei der westlichen Fahrbahn nicht vorhanden ist. Hier zeigt sich erneut, dass die Genauigkeit von kinematischen Laserscanningsystemen von systematischen Abweichungen dominiert wird. Berechnet man auf Grundlage der Doppelmessungen eine Standardabweichung für den Einzelwert, erhält man Werte von σ = 0,065 % (= 0,0372°) für die östliche Fahrbahn und σ = 0,028 % (= 0,0160°) für die westliche Fahrbahn. Die Genauigkeit der Querneigung hängt im Wesentlichen vom Profillaserscanner, dem Rollwinkel ϕ und dem Boresight-Winkel α ab. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit dieser Komponenten sind Wiederholgenauigkeiten im Hundertstelgrad-Bereich akzeptabel.

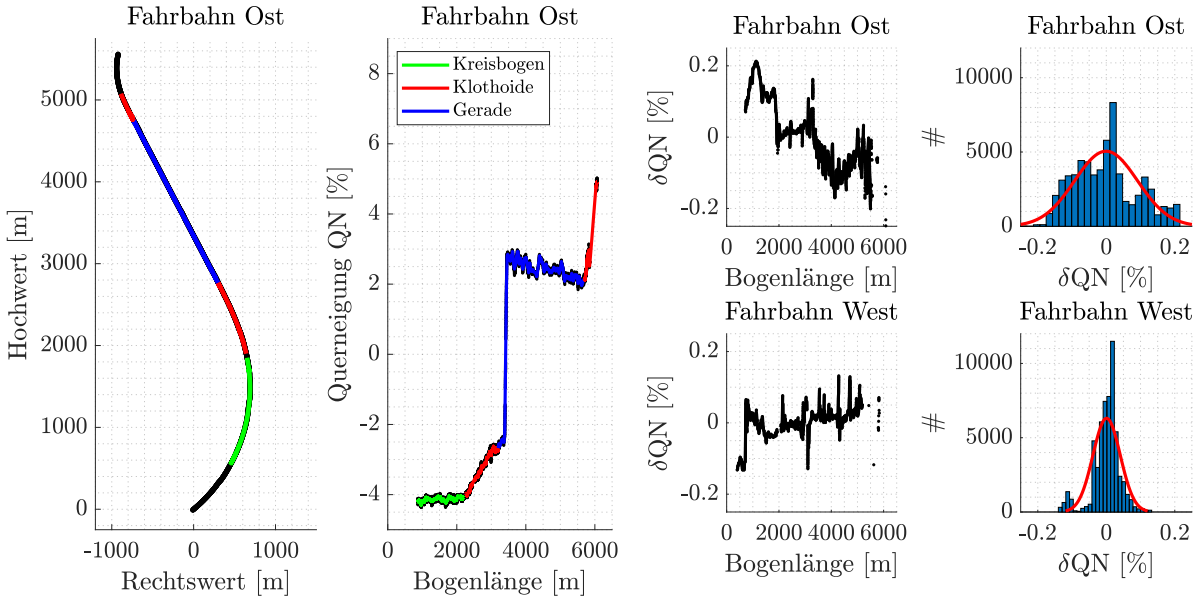


Abbildung 5.28: Aus Straßenquerprofilen abgeleitete Querneigung QN der östlichen Fahrbahn der Autobahn A44n (**links**). Querneigungsdifferenzen δQN zwischen der 1. und 2. Messung für die östliche Fahrbahn (**oben rechts**) und die westliche Fahrbahn (**unten rechts**). Die Querneigungsdifferenzen δQN aus 1 und 2. Messung zeigen die Wiederholgenauigkeit des Mobile Mapping Systems an (Abbildung aus Heinz et al. [2020a], modifiziert).

Die Ergebnisse für die Spurrinnentiefe sowie die fiktive Wassertiefe sind in Tab. 5.8 zusammengefasst. Die angegebenen Werte repräsentieren die mittleren Maximalwerte für den untersuchten 6 km langen Abschnitt der Autobahn A44n. Sowohl die westliche als auch die östliche Fahrbahn bestehen aus jeweils drei parallelen Fahrspuren, sodass sich insgesamt sechs Fahrspuren ergeben. Da Spurrinnen typischerweise zweimal pro Fahrspur auftreten, sind die Werte jeweils für die linke und rechte Hälfte einer Fahrspur angegeben (SPTL: Spurrinnentiefe links, SPTR: Spurrinnentiefe rechts, SPHL: fiktive Wassertiefe links, SPHR: fiktive Wassertiefe rechts). Des Weiteren werden in Tab. 5.8 die Ergebnisse aus der 1. und der 2. Messung angeführt, die sich dahingehend unterscheiden, dass bei der 1. Messung eine Scanrate von 1016 kHz und bei der 2. Messung eine Scanrate von 508 kHz für den eingesetzten Profillaserscanner Z+F Profiler 9012A verwendet wurde. Die Berechnung der Spurrinnentiefe erfolgt durch seitliche Verschiebung einer simulierten 2 m Latte über das Straßenquerprofil, wobei für jede Position der Latte ein Stichmaß berechnet wird. Daraus lässt sich anschließend auch die fiktive Wassertiefe als horizontbezogene Spurrinnentiefe ableiten (siehe Abb. 5.27).

Tabelle 5.8: Mittlere Maximalwerte der Spurrinnentiefe und der fiktiven Wassertiefe für alle sechs Fahrspuren der Autobahn A44n (SPTL: Spurrinnentiefe links, SPTR: Spurrinnentiefe rechts, SPHL: fiktive Wassertiefe links, SPHR: fiktive Wassertiefe rechts). Bei der 1. Messung wurde eine Scanrate von 1016 kHz und bei der 2. Messung eine Scanrate von 508 kHz für den Profillaserscanner Z+F Profiler 9012A verwendet.

	1. Messung (1016 kHz)				2. Messung (508 kHz)			
Fahrspur	**SPTL**	**SPTR**	**SPHL**	**SPHR**	**SPTL**	**SPTR**	**SPHL**	**SPHR**
1 (Ost)	3,2 mm	3,4 mm	0 mm	0 mm	2,5 mm	2,2 mm	0 mm	0 mm
2 (Ost)	3,3 mm	3,6 mm	0 mm	0 mm	2,6 mm	2,8 mm	0 mm	0 mm
3 (Ost)	3,2 mm	2,8 mm	0 mm	0 mm	2,1 mm	1,9 mm	0 mm	0 mm
1 (West)	3,0 mm	3,1 mm	0 mm	0 mm	2,2 mm	2,2 mm	0 mm	0 mm
2 (West)	4,0 mm	3,5 mm	0 mm	0 mm	2,9 mm	2,6 mm	0 mm	0 mm
3 (West)	3,2 mm	2,3 mm	0 mm	0 mm	2,9 mm	1,5 mm	0 mm	0 mm
∅	3,3 mm	3,1 mm	0 mm	0 mm	2,5 mm	2,2 mm	0 mm	0 mm

Hinsichtlich der Spurrinnentiefe erkennt man, dass die Werte der 1. Messung im Durchschnitt bei 3,1 mm bzw. 3,3 mm liegen. Bei der 2. Messung sind die Werte kleiner und liegen im Durchschnitt bei 2,2 mm bis 2,5 mm. Die beiden Messungen liefern also unterschiedliche Ergebnisse. Um die Resultate korrekt bewerten zu können, müssen die Eigenschaften des verwendeten Mobile Mapping Systems in die Betrachtung eingeschlossen werden. Die Spurrinnentiefe bzw. die fiktive Wassertiefe sind Zustandsparameter, die die innere Geometrie der Straßenoberfläche beschreiben und deren Genauigkeit im Wesentlichen durch den Profillaserscanner bestimmt wird. Wie bereits erwähnt, wurden für die beiden Messungen unterschiedliche Scanraten verwendet (1016 kHz und 508 kHz). Gemäß Abschnitt 5.3.2 haben die beiden Messungen also unterschiedliche stochastische Eigenschaften. Die mittlere zurückgestreute Intensität der Straßenoberfläche betrug in etwa $I = 40000$ Inc. Setzt man dies in die stochastischen Modelle des Profillaserscanners Z+F Profiler 9012A aus Tab. 5.1 ein, erhält man folgende Werte für die Präzision σ_d der Distanzmessung:

$$\sigma_d^{1016\ kHz} = 15{,}67256 \cdot I^{-0{,}81170} + 0{,}00024 = 15{,}67256 \cdot 40000^{-0{,}81170} + 0{,}00024 = 3{,}1 \text{ mm}, \tag{5.3}$$

$$\sigma_d^{508\ kHz} = 8{,}21610 \cdot I^{-0{,}78192} + 0{,}00015 = 8{,}21610 \cdot 40000^{-0{,}78192} + 0{,}00015 = 2{,}2 \text{ mm}. \tag{5.4}$$

Die berechneten Standardabweichungen von 3,1 mm bzw. 2,2 mm passen relativ gut mit den Durchschnittswerten aus Tab. 5.28 zusammen, sodass die berechneten Spurrinnentiefen als nicht signifikant eingestuft werden können. An dieser Stelle tritt der Mehrwert der intensitätsbasierten stochastischen Modelle zur korrekten Bewertung der Resultate hervor. Auch verdeutlichen die Betrachtungen den Stellenwert adäquater Einstellungen für den Profillaserscanner im Rahmen einer Anwendung (siehe Abschnitt 5.3.4). Es sei angemerkt, dass die intensitätsbasierten stochastischen Modelle für den Z+F Profiler 9012A aus Abschnitt 5.3.2 auch bei der Schätzung der Regressionsgeraden für die Querneigung verwendet wurden.

Die fiktive Wassertiefe SPH in Tab. 5.8 beträgt bei allen Messungen 0 mm, was laut FGSV bei neu gebauten Straßen auch gefordert ist [FGSV, 2006]. Basierend auf den Messungen kann daher geschlussfolgert werden, dass sich die Querebenheit der Straßenoberfläche der Autobahn A44n in einem gutem Zustand befindet. Es konnten keine signifikanten Spurrinnen oder fiktiven Wassertiefen nachgewiesen werden, die den Fahrkomfort bzw. die Fahrsicherheit beeinträchtigen. Auch die Querneigung der Straße entspricht den technischen Vorgaben. Insgesamt zeigt sich, dass das Mobile Mapping System die Querneigung mit einer Standardabweichung von $\sigma_{QN} \leq 0{,}065$ % ($\sigma_{QN} \leq 0{,}0372°$) wiederholt bestimmen konnte.

5.5.4 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

Die wesentlichen Erkenntnisse der Abschnitte 5.5.1 bis 5.5.3 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Da das funktionale und stochastische Modellwissen bei kinematischen Laserscanningsystemen zum Teil lückenhaft ist, hat sich in der Praxis anstelle der theoretischen Modellierung mehrheitlich die empirische Bestimmung der Genauigkeit des Gesamtsystems mithilfe von Wiederholungsmessungen oder durch den Vergleich mit Referenzwerten etabliert. Die Methoden zur empirischen Analyse der Genauigkeit lassen sich in punkt-, flächen und parameterbasierte Verfahren unterteilen. Diese haben jeweils verschiedene Vor- und Nachteile, sodass sich eine Kombination der Ansätze anbietet.

- Punktbasierte Verfahren mithilfe von Kontrollpunkten erlauben eine getrennte Untersuchung der Lage- und Höhengenauigkeit sowie eine Bestimmung der Präzision und Richtigkeit des Gesamtsystems. Eine Analyse einzelner Systemkomponenten (z. B. Trajektorienschätzung oder Systemkalibrierung) mithilfe von Kontrollpunkten ist hingegen schwierig.

- Flächenbasierte Verfahren mithilfe von Punktwolkenvergleichen ermöglichen es, einzelne Systemkomponenten detaillierter zu analysieren. Dies setzt aber voraus, dass die Punktwolkenvergleiche sachgemäß eingesetzt werden. Herausfordernd sind hierbei die Wahl der Vergleichsmethode – dies betrifft sowohl die Software als auch den Algorithmus – sowie die korrekte Interpretation und Würdigung der Ergebnisse. Im Zuge der Anwendung ist zudem auf eine ausreichende Sensitivität für die zu untersuchenden Systemkomponenten zu achten, da vorhandene Abweichungen ansonsten verborgen bleiben (z. B. ist eine Höhenabweichung bei der Erfassung einer vertikalen Wand nicht detektierbar).

- Die parameterbasierten Verfahren zeigen auf, wie genau die eigentlichen Zielgrößen einer Messkampagne aus den Daten extrahiert werden können. Dabei besteht jedoch eine große Abhängigkeit von der Anwendung, da diese festsetzt, welche Parameter zu Evaluierungszwecken genutzt werden sollten.

- Die parameterbasierte Evaluierung wurde am Beispiel einer Straßenzustandserfassung mit den Zielgrößen Querneigung, Spurrinnentiefe und fiktive Wassertiefe demonstriert. Die Untersuchungen belegen die Einsatzbarkeit des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems für diese Anwendung und attestieren der untersuchten Autobahn A44n einen guten Straßenzustand. Ferner bestätigen die Analysen den Mehrwert der intensitätsbasierten stochastischen Modelle für den Profillaserscanner Z+F Profiler 9012A aus Abschnitt 5.3 zur korrekten Interpretation der Ergebnisse.

- Punktbasierte und flächenbasierte Evaluierungsstrategien werden in Form eines Referenzfestpunktfeldes und TLS-Referenzpunktwolken in einer dauerhaft installierten und allgemein zugänglichen Evaluierungseinrichtung am Campus Klein-Altendorf realisiert. Die Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme ist bisher nicht standardisiert und Einrichtungen zur Evaluierung sind zurzeit nur eingeschränkt verfügbar, sodass die aufgebaute Infrastruktur zu einer Verbesserung dieser Situation beiträgt. Die Evaluierungseinrichtung soll zukünftig erweitert werden (siehe hierzu Kapitel 6).

6. Weiterführende Betrachtungen

Diese Dissertation liefert methodische Beiträge und Ergebnisse zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning. Ergänzend dazu wurde am Campus Klein-Altendorf eine Infrastruktur zum Zwecke der Kalibrierung und Evaluierung entsprechender Systeme aufgebaut. Darüber hinaus bietet die Thematik viel Potential für weiterführende Betrachtungen, die eng mit der aufgebauten Infrastruktur in Verbindung stehen. Diesbezüglich sind im Rahmen dieser Dissertation Untersuchungen durchgeführt worden, die bisher keinen Eingang in Publikationen gefunden haben, jedoch vielversprechende Ergebnisse liefern und als die nächsten Schritte denkbar sind. Dazu zählen der Ausbau der Evaluierungseinrichtung (Abschnitt 6.1), die Erweiterung des ebenenbasierten Kalibrierfeldes um die Kalibrierung von Kameras (Abschnitt 6.2) und die Implementierung der entropiebasierten Kalibrierung als zweite unabhängige Kalibriermethode (Abschnitt 6.3). Darüber hinaus soll die gesamte Infrastruktur zukünftig für beliebige kinematische Multisensorsysteme nutzbar sein.

6.1 Ausbau der Evaluierungseinrichtung

Parameterbasierte Evaluierungsmethoden

Die Evaluierungseinrichtung am Campus Klein-Altendorf bietet zurzeit die Möglichkeit einer punktbasierten Evaluierung auf Grundlage von Kontrollpunkten sowie die einer flächenbasierten Evaluierung mithilfe von TLS-Referenzpunktwolken. Laut Kapitel 2 gibt es mit den parameterbasierten Ansätzen eine dritte Methode zur Evaluierung von kinematischen Multisensorsystemen. Die parameterbasierte Evaluierung wurde in Publikation D bereits erfolgreich angewendet, um die Einsetzbarkeit eines kinematischen Laserscanningsystems zur Bestimmung von Straßenzustandsparametern für die Ebenheit von Fahrbahnoberflächen in Querrichtung zu evaluieren. Dabei wurden neben der Querneigung der Straße auch die Spurrinnentiefe und die fiktive Wassertiefe der einzelnen Fahrspuren hinsichtlich ihrer Wiederholgenauigkeit geprüft.



Abbildung 6.1: Parameterbasierte Evaluierung von kinematischen Multisensorsystemen über geometrisch klar strukturierte Gebäudekomplexe (**links**), künstliche Prüfkörper (**mittig**) oder Straßenzustandsparameter (**rechts**).

Parameterbasierte Evaluierungsstrategien sind in der aufgebauten Infrastruktur bisher nicht implementiert. Für die Zukunft ist dies jedoch denkbar. Hinsichtlich der zu untersuchenden Parameter müsste zunächst definiert werden, welche Parameter überhaupt von Interesse sind. Eine solche Definition sollte anwendungsorientiert erfolgen. So sind bei einem kinematischen Multisensorsystem zur Erfassung von Gebäuden beispielsweise die Position und Ausrichtung von Fassadenoberflächen von Interesse. Bei einer Generalisierung der Fassaden in einem LoD1- oder LoD2-Modell (LoD – Level of Detail) wäre demzufolge die Genauigkeit der Mittelpunkte und Normalen von Ebenen entscheidend. Stehen hingegen Objekte des Straßenraums, wie z. B. Bäume, Schilder, Straßenlaternen oder Litfaßsäulen, im Vordergrund, wäre die Genauigkeit der Achsen,

Radien und Höhen von Zylindern maßgeblich. Bei der Straßenzustandserfassung können im Gegensatz dazu Neigungs-, Planaritäts- oder Krümmungsparameter, aber auch Stichmaße in Form einer Spurrinnentiefe relevant sein. Solche Überlegungen lassen sich für beliebige Anwendungsfälle anstellen.

In Bezug auf die Implementierung von parameterbasierten Evaluierungsansätzen am Campus Klein-Altendorf könnten bereits vorhandene Objektraumstrukturen mit einer wohl definierten geometrischen Form verwendet werden (z. B. die Fassade der Maschinenhalle in Abb. 6.1, links). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, künstliche Objekte in die Einrichtung zu integrieren, ähnlich wie dies bereits im ebenenbasierten Kalibrierfeld mithilfe der Mauerscheiben erfolgt ist. Dabei wäre eine Mischung aus Ebenen, Zylindern, Kugeln und Kegeln denkbar (Abb. 6.1, mittig), da in vielen Anwendungsfällen die aus Punktwolken abzuleitenden Objektgeometrien diesen Formen folgen. In Ergänzung zu künstlichen Objekten könnte außerdem analysiert werden, ob sich die asphaltierten Straßen am Campus Klein-Altendorf über entsprechende Zustandsparameter beschreiben und damit für Evaluierungszwecke nutzen lassen (Abb. 6.1, rechts). Für die zu bestimmenden Parameter sollten Referenzwerte generiert werden, um neben der Präzision, welche durch Wiederholungsmessungen quantifizierbar ist, auch die Richtigkeit der Erfassung zu evaluieren. Zur Bestimmung von Referenzwerten könnten klassische Messverfahren wie Tachymetrie, Nivellement, GNSS oder TLS in Kombination mit dem vorhandenen Referenzfestpunktfeld zum Einsatz kommen (siehe Abschnitt 5.2.1).

Ähnlich wie beim ebenenbasierten Kalibrierfeld wäre es sinnvoll, eine Konfigurationsanalyse durchzuführen. Dabei müsste die Frage beantwortet werden, welche Objekte wo und wie anzuordnen sind, um feststellen zu können, wie gut die zugehörigen Parameter aus den Punktwolken extrahiert werden können. Darüber hinaus wäre es interessant, der Frage nachzugehen, ob sich mögliche Abweichungen des zu evaluierenden Systems durch festgestellte Ungenauigkeiten der Parameter auf die verursachenden Systemkomponenten zurückführen lassen, ähnlich wie dies bei flächenhaften Punktwolkenvergleichen teilweise der Fall ist (siehe Abb. 5.26).

Schienengebundene Referenztrajektorie

Aufgrund der komplexen Verarbeitungskette kinematischer Multisensorsysteme ist die zielführendste Evaluierungsstrategie die empirische Bestimmung der Genauigkeit des Gesamtsystems. Dazu sind die in Kapitel 2.3 beschriebenen punktbasierten, flächenbasierten und parameterbasierten Verfahren einsetzbar. Eine Evaluierung von Einzelkomponenten ist dann sinnvoll, wenn diese vom Rest des Systems trennbar sind.

Der genauigkeitsbegrenzende Faktor bei kinematischen Multisensorsystemen ist meist die Trajektorienschätzung, weshalb eine getrennte Evaluierung dieser Systemkomponente wünschenswert wäre. Die beschriebenen punktbasierten, flächenbasierten und parameterbasierten Verfahren arbeiten auf der vom Gesamtsystem generierten Punktwolke. Die Evaluierung der Trajektorienschätzung darf aber streng genommen nicht über die Punktwolke erfolgen, weil die zu untersuchenden Abweichungen der Trajektorie von Unsicherheiten anderer Systemkomponenten (z. B. Kalibrierung, Zeitsynchronisierung und Aufnahmesensoren) überlagert werden. Dieser Umstand führt hinsichtlich der Evaluierung der Trajektorienschätzung zu Problemen. So sind Wiederholungsmessungen einer identischen Trajektorie zur Bestimmung ihrer Präzision nicht ohne Weiteres möglich. Auch die Bereitstellung von Referenzwerten zur Bewertung der Richtigkeit der geschätzten Position und Orientierung ist schwierig. Im Falle von low-cost Systemen besteht zwar die Möglichkeit, diese auf einer gemeinsamen Plattform mit einem high-end System zu betreiben und gleichzeitig die Trajektorie schätzen zu lassen [Eling et al., 2015a]; mit zunehmender Genauigkeit der Systeme verschließt sich diese Option jedoch, sodass Referenzwerte nur über ein Tracking der Plattform bereitgestellt werden können. Dazu können beispielsweise Tachymeter oder Lasertracker verwendet werden, die jedoch vorab aufwändig über Passpunkte im übergeordneten Bezugssystem georeferenziert werden müssen. Ferner sind hierbei die Aspekte der zeitlichen Synchronisierung zwischen Tachymeter bzw. Lasertracker und Multisensorsystem sowie die gegenseitige Lage der Bezugspunkte (z. B. Mittelpunkt Prisma vs. Referenzpunkt der GNSS-Antenne) zu klären. Dies steht in engem Zusammenhang mit den sensorbasierten Kalibriermethoden aus Kapitel 2.2.

Wie bereits in Heinz et al. [2020c] dargestellt, beinhaltet die am Campus Klein-Altendorf aufgebaute Infrastruktur daher eine schienengebundene Referenztrajektorie, die eine strenge Evaluierung der Trajektorienschätzung ermöglichen soll (Abb. 6.2). Die Schienenbahn hat eine Gesamtlänge von etwa 140 m und zeichnet

sich durch Variation in allen sechs Freiheitsgraden aus: Lage, Höhe und Orientierung (Roll-Winkel ± 10°, Pitch-Winkel ± 20° und Kurswinkel ± 180°). Zurzeit wird ein geeigneter Schienenwagen entwickelt, der es ermöglichen soll, kinematische Multisensorsysteme auf der Bahn zu adaptieren. Einen ersten Prototypen des Schienenwagens zeigt Abb. 6.2 (unten rechts). Auf der Schienenbahn lässt sich eine definierte Trajektorie unter kontrollierten Bedingungen wiederholt abfahren. Dadurch kann die Präzision der Trajektorienschätzung untersucht werden. Direkt neben der Schienenbahn befinden sich zwei Pfeiler, die Teil des am Campus Klein-Altendorf angelegten Referenzfestpunktfeldes sind, sodass auch ein Tracking von Systemen mit einem Tachymeter oder einem Lasertracker möglich ist (Abb. 6.2, unten). Die Georeferenzierung eines Tachymeters bzw. Lasertrackers ist über das vorhandene Festpunktfeld möglich. Darüber hinaus soll untersucht werden, ob sich die Schienenbahn über klassische Messverfahren einmessen lässt, sodass unter Umständen auf ein Tracking verzichtet werden kann.

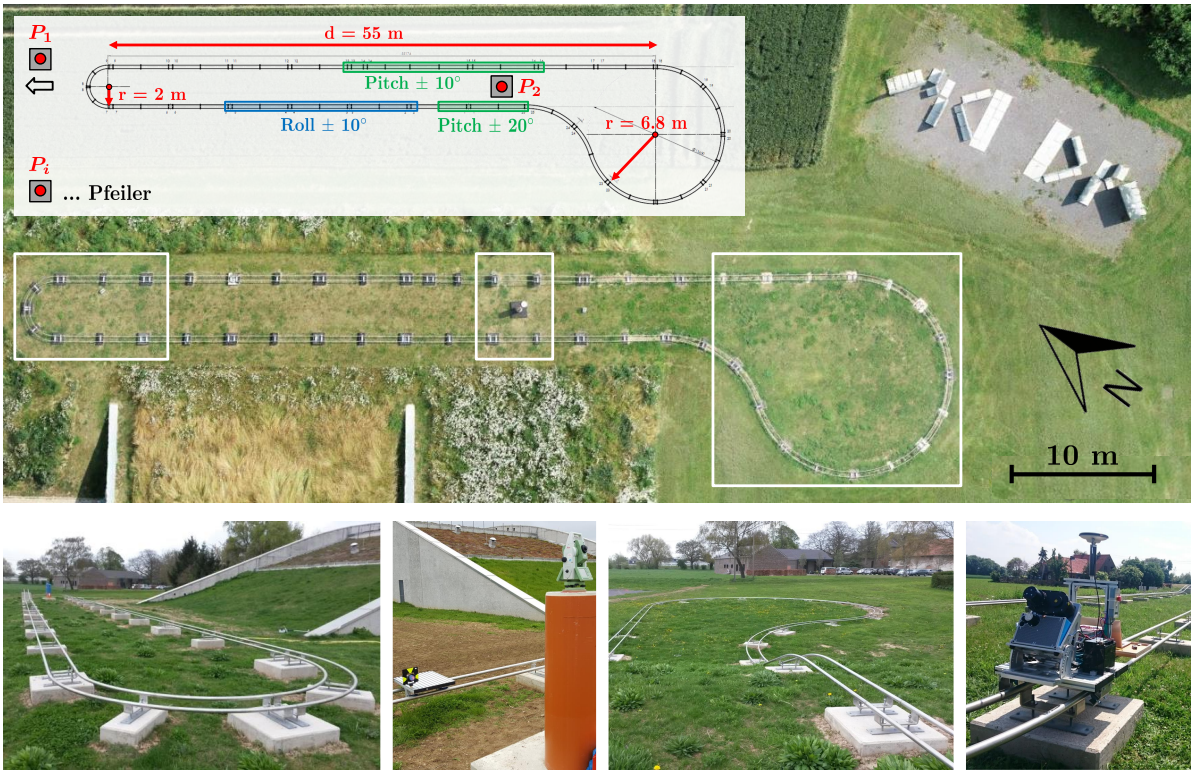


Abbildung 6.2: Schienengebundene Referenztrajektorie mit Schienenwagen zur Evaluierung der Trajektorienschätzung von kinematischen Multisensorsystemen. An der Schienenbahn befinden sich zwei Pfeiler, die für ein Tracking von Systemen nutzbar sind. Neben der Schienenbahn ist auch das ebenenbasierte Kalibrierfeld zu sehen.

Trajektorienevaluierung im ebenenbasierten Kalibrierfeld

Ergänzend zur schienengebundenen Referenztrajektorie ermöglicht auch das ebenenbasierte Kalibrierfeld eine Evaluierung der geschätzten Trajektorie. So liefert der Kalibrieralgorithmus neben den Kalibrierparametern (Hebelarm $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ und Boresight-Winkel α, β und γ) auch Verbesserungen für die Beobachtungen. Durch Nutzung von bekannten Kalibrierparametern kann im Kalibrieralgorithmus das Update für die Parameter deaktiviert werden, sodass lediglich die Verbesserungen der Beobachtungen geschätzt werden. Die Verbesserungen für die Position und Orientierung beinhalten dann sowohl die zufällige und systematischen Abweichungen als auch die groben Fehler und geben Aufschluss über die Genauigkeit der Trajektorie.

Abb. 6.3 zeigt exemplarisch die Verbesserungen der Positions- und Orientierungsschätzung der GNSS/IMU-Einheit des kinematischen Laserscanningsystems aus Publikation E während einer Kalibriermessung unter Verwendung der finalen Kalibrierparameter. Bezüglich der Position (Abb. 6.3, links) erkennt man deutlich,

dass die Plattform gewissen Schwingungen unterliegt, die vom zugrunde liegenden Filter-Algorithmus nicht ausreichend abgebildet werden. Darüber hinaus erkennt man bei den beiden Lagekomponenten Ost und Nord ähnliche Schwingungsperioden, wohingegen die Schwingungen in der Höhenkomponente etwas hochfrequenter sind. Neben den Schwingungen sind auch deutliche systematische Abweichungen zu erkennen. Während die Nordkomponente um etwa 1 mm schwankt, ergeben sich für die Ost- und Höhenkomponente Offsets von im Mittel etwa -4 mm. Wie die Ergebnisse in Publikation E zeigen, besitzt das ebenenbasierte Kalibrierfeld auch ohne Kenntnis der Sollwerte für die Kalibrierparameter die Fähigkeit, systematische Lageabweichungen während der Kalibriermessung aufzudecken. In gleicher Weise lässt sich die Orientierung in Form von Roll-Winkel, Pitch-Winkel und Yaw-Winkel analysieren (Abb. 6.3, rechts).

Derartige Analysen geben einen sehr detaillierten Einblick in die Genauigkeit der Trajektorienschätzung und können zur Verbesserung von Filterarchitekturen eingesetzt werden, z. B. verbesserte Modellierung von Fahrzeugbewegungen oder Anpassung der Trägheit von Filteralgorithmen. Hinsichtlich auftretender Schwingungen können über die Werkzeuge der Zeitreihenanalyse Schwingungsperioden identifiziert und etwaigen Ursachen zugeordnet werden [Heunecke et al., 2013]. Auf diese Weise könnte auch das Design der Trägerplattform hinsichtlich der Dämpfung bestimmter Schwingungsperioden überarbeitet werden.

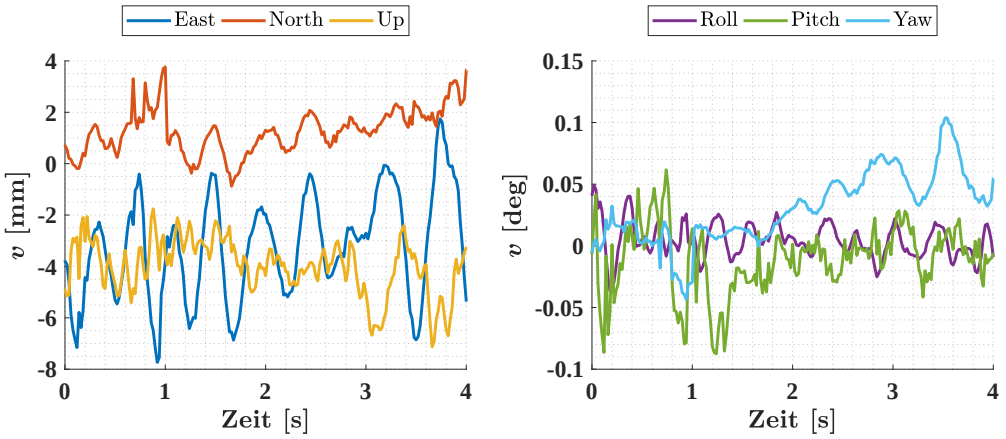


Abbildung 6.3: Evaluierung der geschätzten Positions- und Orientierungsparameter eines kinematischen Multisensorsystems im ebenenbasierten Kalibrierfeld. Die Verbesserungen $\boldsymbol{v}$ entsprechen der Differenz zwischen den Beobachtungen und den ausgeglichenen Beobachtungen bei Verwendung von Sollwerten für die Kalibrierung.

Standardisierte Evaluierung und Prüfung von Systemen

Die Darstellungen in Kapitel 2.3 zeigen, dass es viele verschiedene Möglichkeiten zur Evaluierung von kinematischen Multisensorsystemen gibt. Wie bereits Hauser et al. [2016] feststellen, sind die zugehörigen Verfahren jedoch nicht standardisiert. Für die Zukunft wäre es daher sinnvoll, einheitliche Richtlinien zur Evaluierung aufzustellen [Olsen et al., 2013]. Derartige Richtlinien könnten neben der Definition von Zielgrößen auch Vorgaben für einzuhaltende Grenzwerte hinsichtlich Präzision und Richtigkeit beinhalten. Dies würde den Übergang auf eine strenge Prüfung der Systeme bedeuten. Diesbezüglich könnte eine Differenzierung der Zielgrößen und Grenzwerte in Abhängigkeit der Anwendung erfolgen (z. B. Lichtraumprofilmessung, Extraktion von Straßenmarkierungen oder Bestandsaufnahme und Modellierung von Objekten), sodass die Systeme für bestimmte Anwendungen spezifiziert werden könnten. Im Zuge der Definition von Zielgrößen und Grenzwerten wäre es zudem sinnvoll, einen definierten Messablauf für die Evaluierung bzw. Prüfung vorzuschreiben (d. h. festgelegte Trajektorie, einheitliche Objektraumstrukturen, zeitliche Intervalle für Wiederholungen, etc.). Infrastrukturen, wie sie im Rahmen dieser Dissertation aufgebaut wurden, könnten in diesem Zusammenhang als Ausgangspunkt für die Entwicklung standardisierter Abläufe dienen. Momentan ist die Verfügbarkeit von Testfeldern für kinematische Multisensorsystem noch sehr eingeschränkt (siehe z. B. Barber et al. [2008]; Kaartinen et al. [2012]; Hofmann [2017] oder Stenz et al. [2017]).

6.2 Ebenenbasierte Kalibrierung von Kameras

Grundsätzlich befinden sich auf kinematischen Multisensorsystemen in der Regel auch Kameras. In der Literatur sind viele Ansätze publiziert worden, die eine gegenseitige Kalibrierung von Kameras und Laserscannern ermöglichen. Diese lassen sich in 2D- und 3D-Ansätze unterteilen, je nachdem ob es sich um reine Profillaserscanner oder um 3D-Laserscanner handelt. Methodisch basieren alle Verfahren auf der simultanen Erfassung identischer Objekte mithilfe beider Sensoren, sodass deren Beobachtungen über korrespondierende Strukturen verknüpft werden können. Ansätze auf Basis von Punkt- oder Linienkorrespondenzen sind aufgrund der allgemein schlechteren Auflösung von Laserscannern gegenüber Kameras verhältnismäßig ungenau, weshalb wie bei der Kalibrierung von reinen Laserscanningsystemen Ansätze auf Basis von Ebenen eine herausragende Stellung einnehmen. Dazu werden die Ebenen um kameraseitig erfassbare Strukturen, wie z. B. Schachbrettmuster [Zhang & Pless, 2004; Unnikrishnan & Hebert, 2005; Pandey et al., 2010; Kassir & Peynot, 2010; Geiger et al., 2012; Verma et al., 2019], Hell-Dunkel-Übergänge [Naroditsky et al., 2011] oder Zielzeichen [Mirzaei et al., 2012], ergänzt oder markante Strukturen genutzt [Gong et al., 2013]. Die Verwendung von Schachbrettmustern ist besonders geeignet, weil dadurch auch die innere Orientierung der Kamera verbessert werden kann [Luhmann, 2018]. Zur Kamerakalibrierung erscheint daher die Erweiterung des ebenenbasierten Kalibrierfeldes am Campus Klein-Altendorf um Schachbrettmuster aussichtsreich.

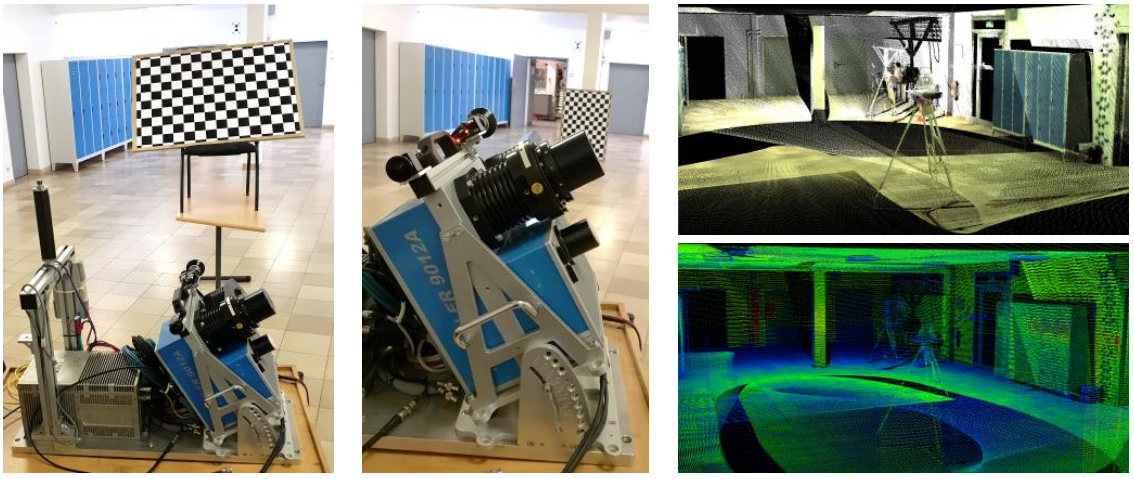


Abbildung 6.4: Kalibrierung zwischen einem Profillaserscanner und einer Kamera mithilfe eines ebenen Schachbretts (**links**). Kinematisch erfasste Punktwolke überlagert mit RGB-Werten bzw. Intensitätswerten (**rechts**). Das Multisensorsystem wurde dazu im Indoor-Bereich mithilfe eines Tachymeters referenziert [Drees & Rückrich, 2019].

Bezüglich der Kamerakalibrierung wurden im Rahmen eines vom Autor dieser Dissertation betreuten Studentenprojektes erste Tests durchgeführt [Drees & Rückrich, 2019]. Das Mobile Mapping System aus Abschnitt 5.1.2 wurde dazu mit zwei monochromatischen Fish-Eye Kameras und einer RGB-Weitwinkelkamera ausgestattet (Abb. 6.4, links). Die Kameras wurden sehr nah am Laserscanner montiert, um Parallaxen zu minimieren und ein möglichst großes gemeinsames Sichtfeld zu erreichen. Für die Kalibrierung der Kameras wurde die Matlab-Toolbox RADOCC verwendet [Kassir & Peynot, 2010]. Dabei wird ein Schachbrett in verschiedenen Positionen und Orientierungen um das Multisensorsystem platziert und mit dem Laserscanner statisch abgescannt. Simultan erfasst die Kamera Bilder, sodass sich korrespondierende Paare aus Scanprofilen und Bildern ergeben. Im ersten Schritt wird das Schachbrettmuster genutzt, um die innere Kalibrierung der Kamera zu bestimmen. Im Zuge dessen werden auch alle Eckpunktkoordinaten des Schachbretts im Kamerakoordinatensystem bestimmt. Auf dieser Grundlage können unter Nutzung der Scanprofile der Hebelarm und die Boresight-Winkel zwischen Kamera und Laserscanner bestimmt werden. Es zeigt sich, dass die Aufnahmekonfiguration zwischen Multisensorsystem und Schachbrett einen Einfluss auf die Qualität der Kalibrierung hat. Abb. 6.4 zeigt eine kinematisch erfasste Punktwolke eingefärbt mit den RGB-Werten der Weitwinkelkamera bzw. den Intensitätswerten des Laserscanners. Die Tests fanden im Indoor-Bereich statt, wobei das GNSS durch ein trackendes Tachymeter ersetzt wurde.

6.3 Entropiebasierte Kalibrierung von Laserscannern

Neben der ebenenbasierten Kalibrierung sind im Rahmen eines weiteren, vom Autor dieser Dissertation betreuten Studentenprojektes auch Untersuchungen in Bezug auf die entropiebasierte Kalibrierung von Laserscannern durchgeführt worden [Janßen, 2017]. Die entropiebasierte Kalibrierung bietet sich als alternatives Kalibrierverfahren an, weil sie eine plattformunabhängige Bestimmung des Hebelarms und der Boresight-Winkel erlaubt und als Selbstkalibrierungsansatz in (weitestgehend) beliebigen Messumgebungen durchführbar ist. Mit der Implementierung der entropiebasierten Kalibrierung am Campus Klein-Altendorf ließe sich die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kalibrierung weiter steigern. Die ebenenbasierte und die entropiebasierte Methode basieren auf unterschiedlichen Konzepten, sollten aber zu gleichen Ergebnissen führen.

Die Leistungsfähigkeit der entropiebasierten Kalibrierung wurde vielfach nachgewiesen (vgl. Kapitel 2.2). Voraussetzung ist dabei jedoch, dass die Umgebung eine ausreichende Struktur besitzt und unter Variation aller sechs Freiheitsgrade abgescannt wird. Für bodengebundene Systeme kann jedoch insbesondere die mangelnde Variation in der Höhe und Neigung ein limitierender Faktor für eine sensitive Kalibrierung aller Parameter sein [Hillemann et al., 2019a]. Abb. 6.5 (links) zeigt die Aufnahme des Poppelsdorfer Schlosses in Bonn mithilfe des Mobile Mapping Systems aus Publikation B. Dabei wurde die Fassade mehrfach unter verschiedenen Blickwinkeln abgescannt. Die blaue Linie zeigt die Trajektorie. Anschließend wurde nach Maddern et al. [2012] eine entropiebasierte Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel vorgenommen. Abb. 6.5 (mittig) zeigt die Niveauflächen der Zielfunktion für die Boresight-Winkel β und γ. Dabei fällt auf, dass das Minimum der Funktion für den Winkel γ deutlich besser bestimmt ist als für den Winkel β, sodass der Datensatz eine geringere Sensitivität für den Boresight-Winkel β besitzt. Ähnliche Probleme hinsichtlich der Sensitivität für den Boresight-Winkel β wurden auch im Rahmen der ebenenbasierten Kalibrierung festgestellt (siehe Abschnitte 5.4.2 und 5.4.3). Neben dem Boresight-Winkel β hat auch die entropiebasierte Bestimmung der vertikalen Hebelarmkomponente Δz Probleme bereitet, was darauf zurückzuführen ist, dass die Trajektorie in Abb. 6.5 praktisch keine Höhenvariation aufweist.

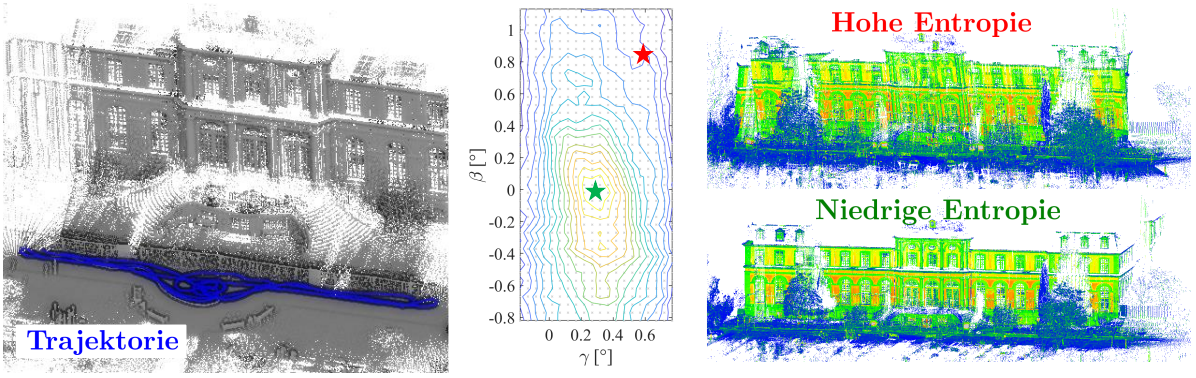


Abbildung 6.5: Entropiebasierte Kalibrierung zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit am Poppelsdorfer Schloss in Bonn. **Links**: Kalibriermessung, **Mitte**: Niveauflächen der entropiebasierten Zielfunktion der Kalibrierung (nur Boresight-Winkel β und γ sind dargestellt), **Rechts**: Punktwolken mit hoher und niedriger Entropie, berechnet mit optimalen (grün) bzw. suboptimalen Kalibrierparametern (rot) [Janßen, 2017].

Die Ergebnisse der entropiebasierten Kalibrierung verdeutlichen, dass auch bei diesem Kalibrieransatz eine Konfigurationsanalyse für die Trajektorie und die Objektraumstruktur erfolgen muss, um sicherzustellen, dass alle Kalibrierparameter sensitiv geschätzt werden können. Mit dieser Fragestellung haben sich jüngst Hillemann et al. [2019a] beschäftigt, wobei der Fokus auf der Trajektorie lag. Für die entropiebasierte Kalibrierung in Klein-Altendorf ist unter Umständen auch die schienengebundene Referenztrajektorie geeignet (Abb. 6.2). Diese weist Variation in allen sechs Freiheitsgraden auf. Hinsichtlich der Objektraumstruktur bestünde die Möglichkeit, Kalibrierobjekte ähnlich den Prüfkörpern in Abb. 6.1 an der Schienenbahn zu platzieren. Da die entropiebasierte Kalibrierung jedoch keine geometrische Beschreibung des Objektraums benötigt, könnten auch beliebige Objekte verwendet werden. Auf Grundlage der Schienentrajektorie könnte analysiert werden, bei welcher Objektraumstruktur eine genaue und zuverlässige Kalibrierung möglich ist.

7. Fazit und Ausblick

Multisensorsysteme für kinematisches Laserscanning haben sich zu einem etablierten Messverfahren innerhalb der Geodäsie und ihrer Nachbardisziplinen entwickelt und werden heutzutage in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt, die von normalen Bestandsaufnahmen bis hin zu anspruchsvollen Aufgaben im Bereich Monitoring und Überwachung reichen. Obwohl die Systeme mittlerweile einen operationellen Status erreicht haben, bleibt die Frage nach der Qualität der Daten – vor allem in Hinblick auf die Genauigkeit der aufgenommenen Punktwolken und daraus abgeleiteter Zielgrößen – häufig unbeantwortet. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass kinematischen Laserscanningsystemen eine komplexe und ineinandergreifende Verarbeitungskette aus Objektraumerfassung, Systemkalibrierung, Zeitsynchronisierung und Trajektorienschätzung zugrunde liegt. Das funktionale und stochastische Modell dieser Verarbeitungskette ist – zumindest in Teilen – nicht ausreichend bekannt. Dies führt dazu, dass sich der Weg einer Vorwärtsmodellierung zur Bestimmung der Genauigkeit der Punktwolke meist verschließt, sodass die Bestimmung der Genauigkeit in der Regel empirisch auf Grundlage der gemessenen Punktwolke erfolgt, z. B. durch wiederholte Messungen oder Vergleiche mit Referenzwerten. Aufgrund der Komplexität der Verarbeitungskette bleibt es häufig bei einer Evaluierung des Gesamtsystems, da die Rückführung der festgestellten Abweichungen auf bestimmte Systemkomponenten im Rahmen einer Rückwärtsmodellierung nur eingeschränkt möglich ist. Dies macht es herausfordernd, Unzulänglichkeiten in bestimmten Systemkomponenten aufzudecken und basierend darauf die Systeme zielgerichtet zu verbessern. Erschwerend kommt hinzu, dass die Methoden zur empirischen Evaluierung mit punktbasierten, flächenbasierten und parameterbasierten Verfahren zwar vielfältig, aber nicht standardisiert sind. Zudem sind Einrichtungen zur Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme zurzeit nur eingeschränkt vorhanden. Vor diesem Hintergrund identifiziert die vorliegende Dissertation die Bewertung und Sicherung der Qualität kinematischer Laserscanningsysteme als nicht vollständig gelöste Fragestellung.

Aufgrund ihrer Komplexität ist die vollständige Lösung dieser Fragestellung als langfristiger Prozess einzustufen, bei dem es darum geht, das funktionale und stochastische Modellwissen über die Verarbeitungskette zu verbessern und geeignete Methoden zur Bewertung und Sicherung der Qualität kinematischer Laserscanningsysteme zu finden. Die vorliegende Dissertation zielt darauf ab, durch gezielte Beiträge im Bereich der Kalibrierung und Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme diesen Prozess konstruktiv mitzugestalten. Dazu lassen sich basierend auf den in Abschnitt 1.2 formulierten Zielsetzungen die wesentlichen Beiträge dieser Dissertation wie folgt zusammenfassen:

1. **Stochastische Modellierung der Distanzmessung von Profillaserscannern**

   Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde eine Methodik entwickelt, um intensitätsbasierte stochastische Modelle für die Distanzmessung von Profillaserscannern zu bestimmen. Diese Erweiterung war notwendig, weil bisherige Ansätze aus dem Bereich des terrestrischen Laserscannings (TLS) nur auf Laserscanner mit 1D- oder 3D-Messmodus anwendbar sind. Durch die Übertragung auf den 2D-Messmodus eines Profillaserscanners wird die Bestimmung und Nutzung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen auch im Bereich des kinematischen Laserscannings möglich. Die entwickelte Methodik zeichnet sich dadurch aus, dass sie ohne zusätzliche Ausrüstung im normalen Gebrauch der Instrumente anwendbar ist und sich auf unterschiedliche Profillaserscanner übertragen lässt. Dies wurde am Beispiel des Z+F Profiler 9012A und des Hokuyo UTM-30LX-EW demonstriert. Der bereits im Bereich TLS festgestellte funktionale Zusammenhang $\sigma_d = a \cdot I^b + c$ zwischen Distanzmessrauschen σ_d und Intensität I ist auch bei Profillaserscannern gültig.

   Im Rahmen der Untersuchungen des Z+F Profiler 9012A wurde die Präzision der Distanzmessung im Nahbereich < 20 m detaillierter analysiert. Im Nahbereich kann es aufgrund von Defokussierungs- und Abschattungseffekten der Laseroptik zu erhöhtem Distanzmessrauschen kommen. Es konnte bestätigt werden, dass der Z+F Profiler 9012A durch eine spezielle Hardware-Optimierung in der Lage ist, den Nahbereichseffekt abzumildern. Dadurch verringert sich das Distanzmessrauschen im Bereich zwischen etwa 1 m und 3,5 m. Im Zuge dessen konnte ebenfalls bestätigt werden, dass die intensitätsbasierten stochastischen Modelle auch im Nahbereich gültig sind.

Die Ableitung intensitätsbasierter stochastischer Modelle für die Distanzmessung von Profillaserscannern führt zu einer verbesserten stochastischen Modellierung kinematischer Laserscanningsysteme und hilft dabei, Messresultate und Ergebnisse besser auswerten und bewerten zu können. Insbesondere die Erkenntnisse für den Nahbereich sind für Anwendungen im Bereich des kinematischen Laserscannings von großer Bedeutung, da man sich in vielen Fällen mit sehr kurzen Zielweiten konfrontiert sieht (z. B. bei Lichtraumprofilmessungen oder Straßenzustandserfassungen). Den Mehrwert der intensitätsbasierten Stochastik konnte im Rahmen der vorliegenden Dissertation im Zuge einer Straßenzustandserfassung auf der Autobahn A44n praktisch demonstriert werden. Für die Zukunft wäre es wünschenswert, auch die Stochastik der Winkelmessung sowie Korrelationen zwischen den Beobachtungen eingehender zu untersuchen. Auf diese Weise ließen sich Profillaserscanner stochastisch vollständig beschreiben.

2. Konfigurationsanalyse für die ebenenbasierte Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit und Aufbau eines dauerhaft installierten Kalibrierfeldes

Bei den Ansätzen zur Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel von Profillaserscannern auf kinematischen Multisensorsystemen nehmen ebenenbasierte Ansätze aufgrund zahlreicher Vorteile eine besondere Stellung ein. Folglich werden ebenenbasierte Ansätze für Systeme auf allen gängigen Trägerplattformen eingesetzt (z. B. Fahrzeuge, Flugzeuge, UAVs, Schiffe, Indoor-Systeme). Ein wichtiger Vorteil der ebenenbasierten Ansätze besteht darin, dass sie auf einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten basieren. Dies erlaubt es, die Schätzung der Kalibrierparameter mit Qualitätskriterien für Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Sensitivität zu analysieren, ähnlich wie es bei geodätischen Netzen der Fall ist. Die Qualität der Kalibrierung hängt neben der Genauigkeit der Beobachtungen auch entscheidend von der Konfiguration der Ebenenanordnung ab. Bisherige Konfigurationsanalysen analysieren die Ebenenanordnung im Wesentlichen mit Kriterien für Genauigkeit und Sensitivität. Der Aspekt der Zuverlässigkeit wird hingegen kaum betrachtet. Im Rahmen dieser Dissertation wurde die Konfigurationsanalyse bei der ebenenbasierten Kalibrierung daher um Maße für die innere und äußere Zuverlässigkeit erweitert. Im Zuge dessen wurde neben zufälligen und systematischen Abweichungen auch der Einfluss grober Fehler auf die Parameterschätzung analysiert. Dadurch ist es möglich, eine Ebenenanordnung zu finden, die eine genaue, zuverlässige und sensitive Schätzung der Kalibrierparameter mit möglichst geringen Korrelationen ermöglicht. Es wurde festgestellt, dass aufgrund der variierenden Architektur von kinematischen Laserscanningsystemen (z. B. Einbaulage des Laserscanners) eine Konfigurationsanalyse streng genommen für jedes System individuell erfolgen muss, da eine veränderte Systemarchitektur auch die Konfiguration verändert. In dieser Dissertation wurde das Werkzeug der Konfigurationsanalyse auf das fahrzeuggetragene Mobile Mapping System aus Abschnitt 5.1.2 angewendet und eine passende Ebenenanordnung abgeleitet, die darüber hinaus auch sensitiv für die Schätzung der Nullpunktabweichung des Profillaserscanners ist. Diese Ebenenanordnung wurde in Form eines dauerhaft installierten Kalibrierfeldes im Outdoor-Bereich realisiert. Die zugehörige Kalibrierprozedur ist schnell (Messdauer: < 1 Minute) und weitestgehend automatisiert. Neben der Konfigurationsanalyse verbessert auch eine schnell wiederholbare Kalibrierprozedur die Zuverlässigkeit der Kalibrierung und erlaubt darüber hinaus empirische Aussagen zu ihrer Genauigkeit und Stabilität.

Bei den Analysen zeigt sich, dass die Genauigkeit der Kalibrierung neben der Ebenenanordnung auch maßgeblich durch die Genauigkeit der Trajektorie bestimmt wird. Während zufällige Abweichungen durch die Redundanz in der Ausgleichung in ausreichendem Maße reduziert werden und grobe Fehler durch Ausreißertests detektierbar sind, haben systematische Abweichungen in der Trajektorie einen direkten Einfluss auf die Erwartungstreue der Kalibrierparameter. Theoretische und empirische Analysen belegen jedoch, dass der Einfluss systematischer Abweichungen auf die Kalibrierung durch eine geschickte Messstrategie in Form einer Zwei-Lagen-Messung bzw. durch die Wiederholung der Kalibrierung zu verschiedenen Zeitpunkten reduziert werden kann. Durch die Wiederholung der Kalibrierung variieren die Systematiken in der Trajektorie über die Zeit und weisen in der Summe ein eher zufälliges Verhalten auf. So lassen sich die geforderten Standardabweichungen ($\sigma_{\Delta x}$, $\sigma_{\Delta y} \leq 1$ mm, $\sigma_{\Delta z} \leq 1{,}5$ mm, σ_α, σ_β, $\sigma_\gamma \leq 0{,}005°$, $\sigma_{d_0} \leq 0{,}1$ mm) für alle Kalibrierparameter auch in der Praxis erreichen. Für die Parameter Δx, Δy, α und d_0 gelingt dies sogar bereits bei einem einzigen Kalibrierdurchlauf. Insgesamt lässt sich die Qualität der Systemkalibrierung durch die Konfigurationsanalyse und die schnell wiederholbare Kalibrierung theoretisch und empirisch durchgreifend beurteilen und sichern.

3. **Erprobung punktbasierter, flächenbasierter und parameterbasierter Evaluierungsstrategien für kinematische Laserscanningsysteme und Aufbau einer dauerhaft installierten Evaluierungseinrichtung**

   Aufgrund des lückenhaften Modellwissens innerhalb der komplexen Verarbeitungskette kinematischer Laserscanningsysteme hat sich in der Praxis anstelle einer Unsicherheitsmodellierung mehrheitlich eine empirische Evaluierung der Systeme durchgesetzt. Die vorliegende Dissertation teilt die Verfahren zur empirischen Analyse der Genauigkeit kinematischer Laserscanningsysteme in punkt-, flächen- und parameterbasierte Verfahren ein und erprobt bzw. erörtert deren Vor- und Nachteile. Insgesamt zeigt sich, dass sich eine Kombination der Ansätze anbietet, um unterschiedliche Aspekte des Systems beleuchten zu können. So erlauben Vergleiche an Kontrollpunkten zum Beispiel eine gute Bestimmung der Lage- und Höhengenauigkeit sowie von Präzision und Richtigkeit des Gesamtsystems, während Punktwolkenvergleiche bei sachgemäßem Einsatz Einblicke in einzelne Systemkomponenten ermöglichen können (z. B. Höhengenauigkeit, Qualität der Kalibrierparameter). Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde eine dauerhaft installierte Evaluierungseinrichtung für kinematische Laserscanningsysteme aufgebaut, die aus einem Referenzfestpunktfeld und TLS-Referenzpunktwolken besteht. Die Evaluierung kinematischer Laserscanningsysteme ist bisher nicht standardisiert und Einrichtungen zur Evaluierung der Systeme sind nur sehr eingeschränkt vorhanden. Vor diesem Hintergrund trägt die aufgebaute Evaluierungseinrichtung zur Verbesserung dieser Situation bei. Bei aus Punktwolken abzuleitenden Parametern besteht eine große Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung. Daher wurden parameterbasierte Evaluierungsstrategien im Rahmen einer Straßenzustandserfassung anwendungsbezogen erprobt. Durch die Betrachtung der Zustandsparameter Querneigung, Spurrinnentiefe und fiktive Wassertiefe konnte die Anwendbarkeit des zu evaluierenden Mobile Mapping Systems sowie der zufriedenstellende Zustand der Straßenoberfläche der Autobahn A44n nachgewiesen werden. Bei der Analyse der Straßenzustandsparameter konnten die intensitätsbasierten stochastischen Modelle (siehe Punkt 1.) im Auswerteprozess gewinnbringend eingesetzt werden.

Wie die weiterführenden Überlegungen in Kapitel 6 verdeutlichen, besteht hinsichtlich der Kalibrier- und Evaluierungseinrichtung noch großes Erweiterungspotential. Dies betrifft zum Beispiel die Implementierung von parameterbasierten Evaluierungsansätzen in Ergänzung zu dem bereits vorhandenen Referenzfestpunktfeld und den TLS-Referenzpunktwolken. Eine solche Erweiterung sollte jedoch anwendungsbezogen durchgeführt werden, damit die Evaluierungsergebnisse einen praktischen Nutzen haben. Auch die getrennte Evaluierung der Trajektorienschätzung ist ein wichtiger Punkt für zukünftige Arbeiten. Dazu steht eine bereits vor Ort installierte schienengebundene Referenztrajektorie zur Verfügung. Außerdem zeigen erste Untersuchungen, dass auch das ebenenbasierte Kalibrierfeld zum Zwecke der Trajektorienevaluierung eingesetzt werden kann. Insgesamt wäre es erstrebenswert in der Einrichtung am Campus Klein-Altendorf eine standardisierte Evaluierungsprozedur zu entwickeln, die alle Evaluierungsstrategien umfasst und am Ende ein aussagekräftiges Evaluierungsprotokoll liefert. Langfristig wäre es wünschenswert, die Stochastik kinematischer Laserscanningsysteme so gut zu verstehen, dass man für jeden Punkt in der Punktwolke eine eigene Kovarianzmatrix ableiten kann, die die Genauigkeit beschreibt. Aufgrund der Komplexität der Verarbeitungskette und der Variabilität der Stochastik ist dies jedoch als ein sehr ambitioniertes Ziel anzusehen.

Hinsichtlich der Kalibrierung ist es überlegenswert, das Kalibrierfeld um die Kalibrierung von Kameras zu erweitern, da Kameras häufig auch Bestandteil kinematischer Laserscanningsysteme sind. Der Blick in die Fachliteratur zeigt, dass sich ebenenbasierte Kalibrieransätze auch gut zur gegenseitigen Kalibrierung von Kameras und Laserscannern eignen. Um die Kontrollierbarkeit der Kalibrierung weiter zu steigern, wäre es zudem sinnvoll, die Einrichtung um ein zweites, unabhängiges Kalibrierverfahren zu erweitern. Vielversprechend ist hierbei die entropiebasierte Kalibrierung, da sie plattformunabhängig ist und als Selbstkalibrierung ohne Referenzinformation auskommt. Da die Qualität der entropiebasierten Kalibrierung von der Objektraumstruktur und der Variation der sechs Freiheitsgrade der Trajektorie abhängt, müsste hier auch eine Analyse erfolgen, welche Bereiche der Einrichtung für dieses Kalibrierverfahren geeignet sind.

Die methodischen Beiträge und Untersuchungen der vorliegenden Dissertation sowie der Aufbau einer Kalibrier- und Evaluierungseinrichtung tragen zu einer verbesserten Qualitätsanalyse und -sicherung kinematischer Laserscanningsysteme bei. Vor diesem Hintergrund leistet die Dissertation einen wichtigen Beitrag, um den oben angesprochenen, langfristigen Prozess progressiv voranzutreiben.

8. Auflistung weiterer Publikationen

In diesem Kapitel werden weitere Publikationen des Autors dieser Dissertation aufgelistet. Diese Publikationen unterscheiden sich von den relevanten Publikationen in Kapitel 4 dahingehend, dass die Inhalte entweder bereits durch die relevanten Publikationen abgedeckt sind, der Autor nur als Koautor auftritt oder die Publikationen nicht in direktem Zusammenhang zur vorliegenden Dissertation stehen. Publikationen, die wissenschaftlich begutachtet wurden, sind mit einem Dreieck (▷) kenntlich gemacht.

Kalibrierung, Evaluierung und Anwendung von kinematischen Laserscanningsystemen

- Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2016). Development of a Portable Mobile Laser Scanning System with Special Focus on the System Calibration and Evaluation. In *5th International Conference on Machine Control & Guidance (MCG), 5-6 October 2016, Vichy, France*

- Heinz, E., Eling, C., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2019a). Monitoring the planarity and subsidence of a motorway using kinematic laser scanning. In *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece*

- Heinz, E., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2020c). Aufbau einer Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile Mapping Systemen. In *Wunderlich, T. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 20 – Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, München, Deutschland* (pp. 113–125). Wichmann Verlag, Berlin

Evaluierung und Anwendung von Unmanned Aerial Vehicles mit Kameras

- ▷ Eichel, J., Draebing, D., Kattenborn, T., Senn, J. A., Klingbeil, L., Wieland, M., & Heinz, E. (2020). UAV-based mapping of turk-banked solifluction lobe movement and its relation to material, geomorphometric, thermal and vegetation properties. *Permafrost and Periglacial Processes*, 31(1), 97–109, doi:10.1002/ppp.2036 (peer-reviewed)

- ▷ Klingbeil, L., Heinz, E., Wieland, M., Eichel, J., Läbe, T., & Kuhlmann, H. (2019). On the UAV based Analysis of Slow Geomorphological Processes: A Case Study at a Solifluction Lobe in the Turtmann Valley. In *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece* (peer-reviewed)

- ▷ Klingbeil, L., Eling, C., Heinz, E., Wieland, M., & Kuhlmann, H. (2017). Direct Georeferencing for Portable Mapping Systems: In the Air and on the Ground. *Journal of Surveying Engineering*, 143(4), 04017010–1–11 (peer-reviewed)

- Klingbeil, L., Eling, C., Heinz, E., Wieland, M., & Kuhlmann, H. (2015). Direct Georeferencing for Portable Mapping Systems – In the Air and on the Ground. In *9th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2015), 9-11 December 2015, Sydney, Australia* (identisch mit Klingbeil et al. [2017], siehe oben)

- Eling, C., Klingbeil, L., Wieland, M., Heinz, E., & Kuhlmann, H. (2015b). UAV Real-Time – Data Use in a Lightweight Direct Georeferencing System. *GPS World*, November Issue, 44–55

- Eling, C., Heinz, E., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2014a). Cycle Slip Detection in the context of RTK GPS positioning of lightweight UAVs. In *4th International Conference on Machine Control & Guidance (MCG), 19-20 March 2014, Braunschweig, Germany* (pp. 148–155)

Genauigkeitsuntersuchung von terrestrischen Laserscannern

- ▷ Heinz, E., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2019b). Zum Einfluss der räumlichen Auflösung und verschiedener Qualitätsstufen auf die Modellierungsgenauigkeit einer Ebene beim terrestrischen Laserscanning. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 126(1-2), 3–12 (peer-reviewed)
- Heinz, E., Medić, T., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2018b). Genauigkeitsbeurteilung von Laserscans anhand realer Messobjekte. In *DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018), Schriftenreihe des DVW, Band 93* (pp. 41–56). Wißner-Verlag, Augsburg
- Heinz, E., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2018a). Erhöhung der räumlichen Auflösung oder Steigerung der Einzelpunktgenauigkeit beim Laserscanning? – Analyse der Modellierungsgenauigkeit am Beispiel einer Ebene. In *Luhmann, T., Schumacher, C.: (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018* (pp. 167–179). Wichmann Verlag, Berlin (identisch mit Heinz et al. [2019b], siehe oben)

Genauigkeitsuntersuchungen zur Übertragung von Höhen mit GNSS

- ▷ Eling, C., Heinz, E., & Kuhlmann, H. (2014). Vergleich von GNSS-Höhenübertragung und Stromübergangsnivellement am Rhein. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*, 139(6), 381–388 (peer-reviewed)

Modellierung von gravitativen Deformationen von VLBI-Radioteleskopen

- Nothnagel, A., Springer, A., Heinz, E., Artz, T., & de Vincente, P. (2014). Gravitational deformation effects: The Yebes 40 m telescope case. In *Behrend, D., Baver K. D., Armstrong, K. L. (Eds.): International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2014 General Meeting Proceedings: "VGOS: The New VLBI Network", Science Press, Beijing, China* (pp. 158–162)

Abbildungsverzeichnis

1.1 Verarbeitungskette eines Multisensorsystems für kinematisches Laserscanning zur Generierung einer Punktwolke. Die vorliegende Dissertation widmet sich den orange hinterlegten Teilaspekten. 5

3.1 Bezugssystem des Profillaserscanners (s-frame). Aufgenommene Objektpunkte lassen sich entweder über kartesische Koordinaten $[x_s, y_s, z_s]^T$ oder Polarkoordinaten mit Distanz d_s und Scanwinkel b_s beschreiben (Quelle der Originalabbildungen des Laserscanners: Zoller & Fröhlich GmbH, Wangen im Allgäu, Deutschland). 20

3.2 Unterschiedliche Bezugssysteme und Transformationsschritte zur Bestimmung einer georeferenzierten Punktwolke aus den Beobachtungen eines kinematischen Laserscanningsystems. Transformationsreihenfolge: s(ensor)-frame → b(ody)-frame → n(avigation)-frame → e(arth)-frame (Abbildung aus Heinz et al. [2020b]). 21

3.3 Einflussgrößen auf die Genauigkeit einer Messung beim Laserscanning. Während die Winkelmessung nur instrumentellen Einflüssen unterliegt, wirken sich Einflüsse aus allen vier Kategorien auf die Distanzmessung aus (Darstellung angelehnt an Soudarissanane [2016] und Kuhlmann & Holst [2017]). 24

3.4 Simulation der distanzabhängigen Signaldämpfung für die optische Empfangseinheit des Z+F Profiler 9012 (grün) bzw. Z+F Profiler 9012A (blau) (Quelle der Originalabbildung: Zoller & Fröhlich GmbH, Wangen im Allgäu, Deutschland; Abbildung aus Heinz et al. [2018c], modifiziert). 26

4.1 Kategorisierung und inhaltliche Verbindung der fünf relevanten Publikationen A – E. 33

5.1 **Oben**: Tragbares low-cost Laserscanningsystem bestehend aus einer GNSS/IMU-Einheit [Eling, 2016] und einem Profillaserscanner Hokuyo UTM-30LX-EW [Hokuyo Automatic Co., Ltd., 2020]. **Unten**: Punktwolke des Poppelsdorfer Schlosses in Bonn (Abbildungen aus Heinz et al. [2015], modifiziert). 42

5.2 **Oben**: Mobile Mapping System mit einer GNSS/IMU-Einheit iMAR iNAV-FJI-LSURV [IMAR Navigation GmbH, 2016] und einem Profillaserscanner Z+F Profiler 9012A [Zoller & Fröhlich GmbH, 2020]. Das System lässt sich auf einem Trolley oder einem Fahrzeug adaptieren. **Unten**: Punktwolken der alten Sternwarte in Bonn sowie der Autobahn A44n nahe Mönchengladbach (Abbildungen aus Heinz et al. [2020a,b], modifiziert). 43

5.3 Referenzfestpunktfeld zur punkthaften Evaluierung von kinematischen Multisensorsystemen (6 Pfeiler (rot), 15 Gebäudepunkte (orange) und 16 Bodenpunkte (blau)). Die Kontrollpunkte können mit speziellen BOTA8-Targets signalisiert werden (Quelle der Luftbilder: Google Earth; Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert). 45

5.4 TLS-Referenzpunktwolken zur flächenhaften Evaluierung von kinematischen Multisensorsystemen. Die Punktwolken wurden mit einer Leica ScanStation P20 erfasst und unter Nutzung des Referenzfestpunktfeldes mit BOTA8-Targets hochgenau georeferenziert (Abbildung aus Heinz et al. [2020b]). 46

5.5 Ebenenbasiertes Kalibrierfeld am Campus Klein-Altendorf zur Bestimmung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit auf einem kinematischen Multisensorsystem (Abbildung aus Heinz et al. [2020b]). 46

5.6 **(a)** Statisches Abscannen einer Oberfläche mit dem Profillaserscanner über einige Sekunden erzeugt eine Menge sich überlappender Scanprofile **(b)** Zwei intensitätskodierte Scans auf eine weiße Oberfläche in einer Distanz von 5 m mit einem horizontalen Einfallswinkel von 0° (orange) bzw. 80° (blau), **(c)** Verteilung der Distanzmessungen von zwei zufällig ausgewählten Winkelschritten, die in Abbildung (b) mit einem Rechteck gekennzeichnet sind. Die Streuung der Histogramme zeigt das Distanzmessrauschen σ_d an. Eine höhere Intensität führt zu einem geringeren Distanzmessrauschen und umgekehrt. 48

5.7 Intensitätsbasierte stochastische Modelle für die Präzision der Distanzmessung des Z+F Profiler 9012A für alle drei verfügbaren Scanraten: (a) 1016 kHz, (b) 508 kHz, (c) 254 kHz, (d) alle Modelle. 49

5.8 **(a)** Präzision σ_d und **(b)** Intensität I der Distanzmessungen des Z+F Profiler 9012A als Funktion der Distanz. Die Ergebnisse beziehen sich auf Messungen auf eine weiße Oberfläche mit den sechs möglichen Einstellungen des Sensors hinsichtlich Profilrate (50 rps, 100 rps, 200 rps) und Scanrate (254 kHz, 508 kHz, 1016 kHz). 50

5.9 **Links**: Intensitätsbasiertes stochastisches Modell für die Präzision der Distanzmessung des Profillaserscanner Hokuyo UTM-30LX-EW. **Rechts**: Die Distanzmessungen im Intensitätsbereich $I \in [950{,}1050]$ zeigen ein abweichendes Verhalten gegenüber dem Modell. Die Ursache dafür ist unklar, der Effekt jedoch reproduzierbar. 51

5.10 Ausschnitt einer Punktwolke der Autobahn A44n, die mithilfe des Profillaserscanners Z+F Profiler 9012A des Mobile Mapping Systems erfasst wurde. Die Erfassung erfolgte mit Scanraten von 508 kHz und 1016 kHz, was in Abhängigkeit der Intensität I des Laserstrahls zu unterschiedlichen Präzisionen σ_d der Distanzmessung führt. 52

5.11 **(a)** Bestimmung von Referenzwerten für die Ebenennormalen mittels TLS, **(b)** Bestimmung einer Punktwolke der Ebenenanordnung mithilfe des kinematischen Laserscanningsystems. Die Trajektorie des Systems ist durch einen Pfeil angedeutet. Die Scanpunkte des mobilen Systems werden automatisch aus den Profillinien extrahiert und der jeweiligen Referenzebene zugeordnet (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert). 55

5.12 Nutzung von V-REP (Virtual Robot Experimentation Platform) zur Simulation der ebenenbasierten Kalibrierung. Gezeigt ist die Aufnahme der am Campus Klein-Altendorf realisierten Ebenenanordnung mit dem Mobile Mapping System. Die Aufnahmen unterscheiden sich hinsichtlich der Neigung des Profillaserscanners. **Links**: 0° Scannerneigung. **Rechts**: 30° Scannerneigung (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert). 59

5.13 Sensitivität der Ebenen gegenüber den Kalibrierparametern. Die Plots zeigen die Punktabstände der kinematisch erfassten Punktwolke zu den Referenzebenen, falls die Kalibrierparameter von ihren wahren Werten abweichen. **Oben**: 0° Scannerneigung. **Unten**: 30° Scannerneigung (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert). 60

5.14 Parameterkorrelationen für 0° Scannerneigung. 61

5.15 Parameterkorrelationen für 30° Scannerneigung. 61

5.16 Redundanzanteile r_i und kleinste aufdeckbare grobe Fehler ∇l_i für die Rollwinkel ϕ, Nickwinkel θ und Kurswinkel ψ der GNSS/IMU-Einheit für Hin- und Rückweg im Kalibrierfeld (Scannerneigung: 0°). 63

5.17 Redundanzanteile r_i und kleinste aufdeckbare grobe Fehler ∇l_i für die Rollwinkel ϕ, Nickwinkel θ und Kurswinkel ψ der GNSS/IMU-Einheit für Hin- und Rückweg im Kalibrierfeld (Scannerneigung: 30°). 63

5.18 Kalibrierdurchlauf im ebenenbasierten Kalibrierfeld mit dem Mobile Mapping System. 64

5.19 Häufigkeitsverteilung der 98 Kalibrierdurchläufe für den Hebelarm $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$, die Boresight-Winkel α, β und γ sowie die Nullpunktabweichung d_0 (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert). 65

5.20 Abfolge der 98 Kalibrierdurchläufe für den Hebelarm $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$, die Boresight-Winkel α, β und γ sowie die Nullpunktabweichung d_0. Die Linien trennen die Blöcke (Abbildung aus Heinz et al. [2020c]). 65

5.21 Verteilung der Kontrollpunkte (blau) zur Evaluierung der Höhenkomponente des Mobile Mapping Systems und GNSS/Nivellement Punkte (rot) zur Bestimmung einer Neigungskorrektion für die Quasigeoidundulation des GCG16-Modells entlang der A44n (Abbildung aus Heinz et al. [2020a], modifiziert). 69

5.22 Signalisierung und Aufnahme eines Kontrollpunktes mit dem Mobile Mapping System (**oben**). Ergebnisse der punktbasierten Evaluierung der Höhenkomponente mit und ohne Korrekturfunktion für das Quasigeoidmodell GCG16 (**unten**) (Abbildung aus Heinz et al. [2020a], modifiziert). 69

5.23 Ergebnisse der punktbasierten Evaluierung des Mobile Mapping Systems am Campus Klein-Altendorf für Ost-, Nord- und Höhenkomponente basierend auf 148 Scans von Kontrollpunkten aus dem Referenzfestpunktfeld (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert). 69

5.24 Beispielhafte Punktwolkenvergleiche aus den Publikationen A (tragbares low-cost Laserscanningsystem, Campus Klein-Altendorf, C2M-Vergleich) und B (fahrzeuggetragenes Mobile Mapping System, Poppelsdorfer Schloss in Bonn, M3C2-Vergleich). Die schwarzen Pfeile zeigen die Trajektorien der Multisensorsysteme während der Objektaufnahme an (Abbildungen aus Heinz et al. [2015, 2017], modifiziert). 71

5.25 C2M-Punktwolkenvergleich zwischen zwei Scans der Fahrbahn an der Autobahn A44n. Die Scans korrespondieren zu Abschnitt 10 in Tab. 5.7 (Abbildung aus Heinz et al. [2020a], modifiziert). 73

5.26 M3C2-Punktwolkenvergleiche zwischen einer TLS-Referenzpunktwolke und Punktwolken des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems. Die Punktwolken des mobilen Systems wurden mithilfe einer Näherungskalibrierung aus der Konstruktionszeichnung des Systems (A1 und B1) und mithilfe der ebenenbasierten Kalibrierung aus Abschnitt 5.4.3 (A2 und B2) berechnet (Abbildung aus Heinz et al. [2020b], modifiziert). 74

5.27 Aus Straßenquerprofilen abgeleitete Zustandsparameter: Querneigung QN, Spurrinnentiefe SPT und fiktive Wassertiefe SPH (Abbildung aus Heinz et al. [2020a], modifiziert; siehe auch FGSV [2009]). 75

5.28 Aus Straßenquerprofilen abgeleitete Querneigung QN der östlichen Fahrbahn der Autobahn A44n (**links**). Querneigungsdifferenzen δQN zwischen der 1. und 2. Messung für die östliche Fahrbahn (**oben rechts**) und die westliche Fahrbahn (**unten rechts**). Die Querneigungsdifferenzen δQN aus 1 und 2. Messung zeigen die Wiederholgenauigkeit des Mobile Mapping Systems an (Abbildung aus Heinz et al. [2020a], modifiziert). 76

6.1 Parameterbasierte Evaluierung von kinematischen Multisensorsystemen über geometrisch klar strukturierte Gebäudekomplexe (**links**), künstliche Prüfkörper (**mittig**) oder Straßenzustandsparameter (**rechts**). 79

6.2 Schienengebundene Referenztrajektorie mit Schienenwagen zur Evaluierung der Trajektorienschätzung von kinematischen Multisensorsystemen. An der Schienenbahn befinden sich zwei Pfeiler, die für ein Tracking von Systemen nutzbar sind. Neben der Schienenbahn ist auch das ebenenbasierte Kalibrierfeld zu sehen. 81

6.3 Evaluierung der geschätzten Positions- und Orientierungsparameter eines kinematischen Multisensorsystems im ebenenbasierten Kalibrierfeld. Die Verbesserungen $\boldsymbol{v}$ entsprechen der Differenz zwischen den Beobachtungen und den ausgeglichenen Beobachtungen bei Verwendung von Sollwerten für die Kalibrierung. 82

6.4 Kalibrierung zwischen einem Profillaserscanner und einer Kamera mithilfe eines ebenen Schachbretts (**links**). Kinematisch erfasste Punktwolke überlagert mit RGB-Werten bzw. Intensitätswerten (**rechts**). Das Multisensorsystem wurde dazu im Indoor-Bereich mithilfe eines Tachymeters referenziert [Drees & Rückrich, 2019]. 83

6.5 Entropiebasierte Kalibrierung zwischen einem Profillaserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit am Poppelsdorfer Schloss in Bonn. **Links**: Kalibriermessung, **Mitte**: Niveauflächen der entropiebasierten Zielfunktion der Kalibrierung (nur Boresight-Winkel β und γ sind dargestellt), **Rechts**: Punktwolken mit hoher und niedriger Entropie, berechnet mit optimalen (grün) bzw. suboptimalen Kalibrierparametern (rot) [Janßen, 2017]. 84

Tabellenverzeichnis

3.1 Definition der benötigten Bezugssysteme zur Bestimmung einer georeferenzierten Punktwolke aus den Daten eines kinematischen Laserscanningsystems. Alle gelisteten Bezugssysteme sind kartesische Rechtssysteme. 19

5.1 Geschätzte Parameter der intensitätsbasierten stochastischen Modelle für den Z+F Profiler 9012A mitsamt der geschätzten Genauigkeit der Parameter für alle drei Scanraten (254 kHZ, 508 kHZ und 1016 kHz). 49

5.2 Geschätzte Parameter des intensitätsbasierten stochastischen Modells für den Hokuyo UTM-30LX-EW mitsamt der geschätzten Genauigkeit der Parameter für die feste Scanrate von 43 kHz. 51

5.3 Angenommene Standardabweichungen σ für die Beobachtungen des fahrzeuggetragenen Mobile Mapping Systems aus Abschnitt 5.1.2 für die Varianzfortpflanzung der Georeferenzierungsgleichung (siehe Gl. (3.9)). 58

5.4 Geschätzte Standardabweichungen σ der Kalibrierparameter für verschiedene Scannerneigungen. 61

5.5 Zeitplan der 98 Kalibrierdurchläufe im ebenenbasierten Kalibrierfeld (Juli & August 2019). . 64

5.6 Mittelwerte und Standardabweichungen der 98 Kalibrierdurchläufe. Die empirische Standardabweichung $\hat{\sigma}$ ergibt sich aus der Streuung der Histogramme in Abb. 5.19. Über Varianzfortpflanzung folgt $\bar{\sigma}_{15} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}$. 65

5.7 Mittelwerte und RMS-Werte der C2M-Punktwolkenvergleiche der Fahrbahn an der Autobahn A44n. Abschnitt 10 korrespondiert zu Abb. 5.25. 73

5.8 Mittlere Maximalwerte der Spurrinnentiefe und der fiktiven Wassertiefe für alle sechs Fahrspuren der Autobahn A44n (SPTL: Spurrinnentiefe links, SPTR: Spurrinnentiefe rechts, SPHL: fiktive Wassertiefe links, SPHR: fiktive Wassertiefe rechts). Bei der 1. Messung wurde eine Scanrate von 1016 kHz und bei der 2. Messung eine Scanrate von 508 kHz für den Profillaserscanner Z+F Profiler 9012A verwendet. 77

Abkürzungen

APD	Avalanche-Photodiode
BIM	Building Information Modeling
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BOTA8	Bonn Target 8
C2C	Cloud-to-Cloud Punktwolkenvergleich
C2M	Cloud-to-Mesh Punktwolkenvergleich
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DHHN16	Deutsches Haupthöhennetz 2016
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
ENU	East North Up
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989
FGSV	Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen
GCG16	German Combined Quasi Geoid 2016
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRS80	Geodetic Reference System 1980
HF	Hochfrequenz
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
LoD	Level of Detail
M3C2	Multiscale-Model-to-Model-Cloud Punktwolkenvergleich
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
NED	North East Down
NMEA	National Marine Electronics Association
PPP	Precise Point Positioning
PPS	Pulse Per Second
QN	Querneigung der Straßenoberfläche
RANSAC	Random Sample Consensus
RGB	RGB-Farbraum (Rot, Grün, Blau)
RMS	Root Mean Square Error

rps	rotations per second
RTK	Real Time Kinematic
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SPH	Fiktive Wassertiefe der Straßenoberfläche
SPT	Spurrinnentiefe der Straßenoberfläche
TIA	Transimpedanzverstärker
TLS	Terrestrial Laser Scanning bzw. Terrestrial Laser Scanner
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UTM32	Universale Transversale Mercator Projektion, Zone 32
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
V-REP	Virtual Robot Experimentation Platform

Literaturverzeichnis

Alkhatib, H. & Kutterer, H. (2013). Estimation of Measurement Uncertainty of kinematic TLS Observation Process by means of Monte-Carlo Methods. *Journal of Applied Geodesy*, 7(2), 125–133.

Baarda, W. (1967). Statistical Concepts in Geodesy. *Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, New Series, Volume 2, Number 4, Delft, Netherlands.*

Baarda, W. (1968). A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks. *Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, New Series, Volume 2, Number 5, Delft, Netherlands.*

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), 128–141.

Bishop, G. D. (1977). *Einführung in lineare elektronische Schaltungen.* Vieweg Verlag, Braunschweig.

Böhler, W., Bordas Vicent, M., & Marbs, A. (2003). Investigating Laser Scanner Accuracy. In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIV-5/C15, CIPA 2003 XVIII International Symposium, 30 September - 4 October 2003, Antalya, Turkey* (pp. 696–701).

Bolkas, D. & Martinez, A. (2018). Effect of target color and scanning geometry on terrestrial LiDAR point-cloud noise and plane fitting. *Journal of Applied Geodesy*, 12(1), 109–127.

Brüggemann, T., Artz, T., & Weiß, R. (2018). Kalibrierung von Multisensorsystemen. In *DVW e.V. (Hrsg.): Hydrographie 2018 – Trend zu unbemannten Messsystemen, Schriftenreihe des DVW, Band 91* (pp. 29–46). Wißner-Verlag, Augsburg.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2017). *Quasigeoid der Bundesrepublik Deutschland – Die Höhenreferenzfläche der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder (GCG2016, German Combined QuasiGeoid 2016).* Technical report, URL: https://sg. geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/quasigeoid.pdf (letzter Zugriff: 06.07.2020).

Bureick, J., Vogel, S., Neumann, I., Unger, J., & Alkhatib, H. (2019). Georeferencing of an Unmanned Aerial System by Means of an Iterated Extended Kalman Filter Using a 3D City Model. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 87(5-6), 229–247.

Chan, T. O., Lichti, D. D., & Glennie, C. L. (2013). Multi-feature based boresight self-calibration of a terrestrial mobile mapping system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 112–124.

Chaudhry, S., Salido-Monzú, D., & Wieser, A. (2019). Simulation of 3D laser scanning with phase-based EDM for the prediction of systematic deviations. In *Proceedings Volume 11057, Modeling Aspects in Optical Metrology VII, 110570H, SPIE Optical Metrology, June 2019, Munich, Germany.*

Chen, S., Liu, J., Wu, T., Huang, W., Liu, K., Yin, D., Liang, X., Hyyppä, J., & Chen, R. (2018). Extrinsic Calibration of 2D Laser Rangefinders Based on a Mobile Sphere. *Remote Sensing*, 10(8), 1176, doi.org/10.3390/rs10081176.

Chow, J. C. K., Lichti, D. D., Glennie, C. L., & Hartzell, P. (2013). Improvements to and Comparison of Static Terrestrial LiDAR Self-Calibration Methods. *Sensors*, 13(6), 7224–7249, doi.org/10.3390/s130607224.

Cloud Compare (2020). *3D Point Cloud and Mesh Processing Software – Open Source Project.* Technical report, URL: https://www.danielgm.net/cc/ (letzter Zugriff: 06.07.2020).

Coppelia Robotics (2020). *V-REP – Virtual Robot Experimentation Platform.* Technical report, URL: http://www.coppeliarobotics.com/ (letzter Zugriff: 06.07.2020).

Dehbi, Y., Lucks, L., Behmann, J., Klingbeil, L., & Plümer, L. (2019). Improving GPS Trajectories Using 3D City Models and Kinematic Point Clouds. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-4/W9, 4th International Conference on Smart Data and Smart Cities, 1-3 October 2019, Kuala Lumpur, Malaysia* (pp. 35–42).

Djuricic, A. & Jutzi, B. (2013). Supporting UAVs in Low Visibility Conditions by Multiple-Pulse Laser Scanning Devices. In *International Archives of*

the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W1, ISPRS Hannover Workshop 2013, 21-24 May 2013, Hannover, Germany (pp. 93–98).

Drees, L. & Rückrich, P. (2019). *Geodetic Mobile Mapping.* Abschlussbericht zum Masterprojekt Mobile Sensing and Robotics (unveröffentlicht), Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn.

Droeschel, D., Stückler, J., & Behnke, S. (2014). Local Multi-Resolution Representation for 6D Motion Estimation and Mapping with a Continuously Rotating 3D Laser Scanner. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 31 May - 5 June 2014, Hong Kong, China* (pp. 5221–5226).

Dupuis, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2017). Improving the kinematic calibration of a coordinate measuring arm using configuration analysis. *Precision Engineering*, 50, 171–182.

Eichel, J., Draebing, D., Kattenborn, T., Senn, J. A., Klingbeil, L., Wieland, M., & Heinz, E. (2020). UAV-based mapping of turk-banked solifluction lobe movement and its relation to material, geomorphometric, thermal and vegetation properties. *Permafrost and Periglacial Processes*, 31(1), 97–109, doi:10.1002/ppp.2036.

Eling, C. (2016). *Entwicklung einer direkten Georeferenzierungseinheit zur Positions- und Orientierungsbestimmung leichter UAVs in Echtzeit.* Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn.

Eling, C., Heinz, E., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2014a). Cycle Slip Detection in the context of RTK GPS positioning of lightweight UAVs. In *4th International Conference on Machine Control & Guidance (MCG), 19-20 March 2014, Braunschweig, Germany* (pp. 148–155).

Eling, C., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2015a). Real-Time Single-Frequency GPS/MEMS-IMU Attitude Determination of Lightweight UAVs. *Sensors*, 15(10), 26212–26235, doi.org/10.3390/s151026212.

Eling, C., Klingbeil, L., Wieland, M., Heinz, E., & Kuhlmann, H. (2015b). UAV Real-Time – Data Use in a Lightweight Direct Georeferencing System. *GPS World*, November Issue, 44–55.

Eling, C., Klingbeil, L., Wieland, M., & Kuhlmann, H. (2014b). Direct Georeferencing of Micro Aerial Vehicles – System Design, System Calibration and First Evaluation Tests. *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2014(4), 227–237.

Eling, C., Heinz, E., & Kuhlmann, H. (2014). Vergleich von GNSS-Höhenübertragung und Stromübergangsnivellement am Rhein. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*, 139(6), 381–388.

Elseberg, J., Borrmann, D., & Nüchter, A. (2013). Algorithmic Solutions for Computing Precise Maximum Likelihood 3D Point Clouds from Mobile Laser Scanning Platforms. *Remote Sensing*, 5(11), 5871–5906, doi.org/10.3390/rs5115871.

FGSV (2006). *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB).* Technical report, Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen.

FGSV (2008). *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA).* Technical report, Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen.

FGSV (2009). *Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil: Berührungslose Messungen (TP Eben).* Technical report, Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen.

Filin, S. (2001). *Calibration of Airborne and Spaceborne Laser Altimeters Using Natural Surfaces.* Dissertation, The Ohio State University.

Filin, S. (2003). Recovery of Systematic Biases in Laser Altimetry Data Using Natural Surfaces. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(11), 1235–1242.

Fischler, M. A. & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395.

Förstner, W. (1979). Ein Verfahren zur Schätzung von Varianz- und Kovarianzkomponenten. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 86(11-12), 446–453.

Förstner, W. (1987). Reliability Analysis of Parameter Estimation in Linear Models with Applications to Mensuration Problems in Computer Vision. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 40(3), 273–310.

Förstner, W. & Wrobel, B. (2016). *Photogrammetric Computer Vision – Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction.* Springer International Publishing, Switzerland.

Friedli, E., Presl, R., & Wieser, A. (2019). Influence of atmospheric refraction on terrestrial laser scanning at long range. In *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece.*

Friess, P. (2006). Toward a Rigorous Methodology for Airborne Laser Mapping. In *International Calibration and Validation Workshop EuroCOW 2006, 25-27 January 2006, Castelldefels, Spain.*

Gargoum, S. A. & El Basyouny, K. (2019). A literature synthesis of LiDAR applications in transportation: feature extraction and geometric assessments of highways. *GIScience & Remote Sensing*, 56(6), 864–893.

Geiger, A., Moosmann, F., Car, O., & Schuster, B. (2012). Automatic Camera and Range Sensor Calibration using a single Shot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 14-18 May 2012, St. Paul, Minnesota, USA* (pp. 3936–3943).

Glennie, C. (2007). Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. *Journal of Applied Geodesy*, 1(3), 147–157.

Glennie, C. (2012). Calibration and Kinematic Analysis of the Velodyne HDL-64E S2 Lidar Sensor. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(4), 339–347.

Gong, X., Lin, Y., & Liu, J. (2013). 3D LIDAR-Camera Extrinsic Calibration Using an Arbitrary Trihedron. *Sensors*, 13(2), 1902–1918, doi.org/10.3390/s130201902.

Gräfe, G. (2007a). High precision kinematic surveying with laser scanners. *Journal of Applied Geodesy*, 1(4), 185–199.

Gräfe, G. (2007b). *Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum.* Dissertation, Universität der Bundeswehr München.

Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems (Second Edition).* Artech House, Boston, London.

Gruber, F. J. & Joeckel, R. (2011). *Formelsammlung für das Vermessungswesen (15., überarbeitete und aktualisierte Auflage).* Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Guan, H., Li, J., Cao, S., & Yu, Y. (2016). Use of mobile LiDAR in road information inventory: a review. *International Journal of Image and Data Fusion*, 7(3), 219–242.

Haala, N., Peter, M., Kremer, J., & Hunter, G. (2008). Mobile LIDAR Mapping for 3D Point Cloud Collection in Urban Areas - A Performance Test. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVII-B5, XXI ISPRS Congress, Commission V, 3-11 July 2008, Beijing, China* (pp. 1119–1124).

Habib, A., Bang, K. I., Kersting, A. P., & Chow, J. (2010). Alternative Methodologies for LiDAR System Calibration. *Remote Sensing*, 2(3), 874–907, doi.org/10.3390/rs2030874.

Hartmann, J., Marschel, L., Dorndorf, A., & Paffenholz, J.-A. (2017a). Ein objektraumbasierter und durch Referenzmessungen gestützter Kalibrierprozess für ein k-TLS-basiertes Multi-Sensor-System. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 124(1-2), 3–10.

Hartmann, J., Paffenholz, J.-A., Strübing, T., & Neumann, I. (2015). Determination of Position and Orientation of LIDAR-Sensors on Multi-Sensor Platforms. In *9th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2015), 9-11 December 2015, Sydney, Australia.*

Hartmann, J., Paffenholz, J.-A., Strübing, T., & Neumann, I. (2017b). Determination of Position and Orientation of LiDAR Sensors on Multisensor Platforms. *Journal of Surveying Engineering*, 143(4), 04017012–1–11.

Hartmann, J., Trusheim, P., Alkhatib, H., Paffenholz, J.-A., Diener, D., & Neumann, I. (2018). High Accurate Pointwise (Geo-)Referencing of a k-TLS Based Multi-Sensor-System. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-4, ISPRS TC IV Mid-term Symposium 3D Spatial Information Science – The Engine of Change, 1-5 October 2018, Delft, The Netherlands.*

Hartmann, J., von Gösseln, I., Schild, N., Dorndorf, A., Paffenholz, J.-A., & Neumann, I. (2019). Optimisation of the Calibration Process of a k-TLS Based Multi-Sensor-System by Genetic Algorithms. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, ISPRS Geospatial Week 2019, 10-14 June 2019, Enschede, The Netherlands* (pp. 1655–1662).

Hauser, D., Glennie, C., & Brooks, B. (2016). Calibration and Accuracy Analysis of a Low-Cost Mapping-Grade Mobile Laser Scanning System. *Journal of Surveying Engineering*, 142(4), 04016011–1–9.

Heinz, E., Eling, C., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2019a). Monitoring the planarity and subsidence of a motorway using kinematic laser scanning. In *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece*.

Heinz, E., Eling, C., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2020a). On the applicability of a scan-based mobile mapping system for monitoring the planarity and subsidence of road surfaces - Pilot study on the A44n motorway in Germany. *Journal of Applied Geodesy*, 14(1), 39–54, doi.org/10.1515/jag–2019–0016.

Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2015). Development, Calibration and Evaluation of a Portable and Direct Georeferenced Laser Scanning System for Kinematic 3D Mapping. *Journal of Applied Geodesy*, 9(4), 227–243, doi.org/10.1515/jag–2015–0011.

Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2016). Development of a Portable Mobile Laser Scanning System with Special Focus on the System Calibration and Evaluation. In *5th International Conference on Machine Control & Guidance (MCG), 5-6 October 2016, Vichy, France*.

Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2017). Analysis of different reference plane setups for the calibration of a mobile laser scanning system. In *Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 17 – Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich* (pp. 131–145). Wichmann Verlag, Berlin, hdl.handle.net/20.500.11811/1352.

Heinz, E., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2018a). Erhöhung der räumlichen Auflösung oder Steigerung der Einzelpunktgenauigkeit beim Laserscanning? – Analyse der Modellierungsgenauigkeit am Beispiel einer Ebene. In *Luhmann, T., Schumacher, C.: (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018* (pp. 167–179). Wichmann Verlag, Berlin.

Heinz, E., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2019b). Zum Einfluss der räumlichen Auflösung und verschiedener Qualitätsstufen auf die Modellierungsgenauigkeit einer Ebene beim terrestrischen Laserscanning. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 126(1-2), 3–12.

Heinz, E., Holst, C., Kuhlmann, H., & Klingbeil, L. (2020b). Design and Evaluation of a Permanently Installed Plane-Based Calibration Field for Mobile Laser Scanning Systems. *Remote Sensing*, 12(3), 555, doi.org/10.3390/rs12030555.

Heinz, E., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2020c). Aufbau einer Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile Mapping Systemen. In *Wunderlich, T. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 20 – Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, München, Deutschland* (pp. 113–125). Wichmann Verlag, Berlin.

Heinz, E., Medić, T., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2018b). Genauigkeitsbeurteilung von Laserscans anhand realer Messobjekte. In *DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018), Schriftenreihe des DVW, Band 93* (pp. 41–56). Wißner-Verlag, Augsburg.

Heinz, E., Mettenleiter, M., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2018c). Strategy for Determining the Stochastic Distance Characteristics of the 2D Laser Scanner Z+F Profiler 9012A with Special Focus on the Close Range. *Sensors*, 18(7), 2253, doi.org/10.3390/s18072253.

Heipke, C. (2017). *Photogrammetrie und Fernerkundung – Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*. Springer Verlag GmbH Deutschland.

Hennes, M. & Heister, H. (2007). Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 114(11-12), 375–383.

Hesse, C. (2007). *Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern*. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., & Neuner, H. (2013). *Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen (2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage)*. Wichmann Verlag, Berlin, Offenbach.

Hillemann, M., Meidow, J., & Jutzi, B. (2019a). Impact of Different Trajectories on Extrinsic Self-Calibration for Vehicle-Based Mobile Laser Scanning Systems. In *International Archives of*

the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W16, PIA19+MRSS19 Photogrammetric Image Analysis & Munich Remote Sensing Symposium: Joint ISPRS conference, 18-20 September 2019, Munich, Germany (pp. 119–125).

Hillemann, M., Weinmann, M., Mueller, M. S., & Jutzi, B. (2019b). Automatic Extrinsic Self-Calibration of Mobile Mapping Systems Based on Geometric 3D Features. *Remote Sensing*, 11(16), 1955, doi.org/10.3390/rs11161955.

Höfle, B. & Pfeifer, N. (2007). Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(6), 415–433.

Hofmann, S. (2017). *Potential von LiDAR Mobile Mapping für hochgenaue Karten.* Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Hofmann, S. & Brenner, C. (2016). Accuracy Assessment of Mobile Mapping Point Clouds Using the Existing Environment as Terrestrial Reference. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, XXIII ISPRS Congress, Commission I, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic* (pp. 601–608).

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS Global Navigation Satellite Systems – GPS, GLONASS, Galileo & more.* Springer Verlag, Wien, New York.

Hokuyo Automatic Co., Ltd. (2020). *Specifications Hokuyo UTM-30LX-EW.* Technical report, URL: https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=170 (letzter Zugriff: 06.07.2020).

Holgado-Barco, A., Gonzalez-Aguilera, D., Arias-Sanchez, P., & Martinez-Sanchez, J. (2014). An automated approach to vertical road characterisation using mobile LiDAR systems: Longitudinal profiles and cross-sections. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 96, 28–37.

Holgado-Barco, A., González-Aguilera, D., Arias-Sanchez, P., & Martinez-Sanchez, J. (2015). Semiautomatic Extraction of Road Horizontal Alignment from a Mobile LiDAR System. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(3), 217–228.

Holst, C. (2015). *Analyse der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans.* Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn.

Holst, C., Artz, T., & Kuhlmann, H. (2014). Biased and unbiased estimates based on laser scans of surfaces with unknown deformations. *Journal of Applied Geodesy*, 8(3), 169–183.

Holst, C. & Kuhlmann, H. (2014). Aiming at self-calibration of terrestrial laser scanners using only one single object and one single scan. *Journal of Applied Geodesy*, 8(4), 295–310.

Holst, C., Medić, T., & Kuhlmann, H. (2018). Dealing with systematic laser scanner errors due to misalignment at area-based deformation analyses. *Journal of Applied Geodesy*, 12(2), 169–185.

Holst, C., Neuner, H., Wieser, A., Wunderlich, T., & Kuhlmann, H. (2016). Calibration of Terrestrial Laser Scanners. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 123(6), 147–157.

Holst, C., Schmitz, B., Schraven, A., & Kuhlmann, H. (2017). Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? – Eine Fallstudie anhand von Laserscans einer Holzplatte und einer Staumauer. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*, 142(2), 98–110.

Hong, S., Park, I., Lee, J., Lim, K., Choi, Y., & Sohn, H.-G. (2017). Utilization of a Terrestrial Laser Scanner for the Calibration of Mobile Mapping Systems. *Sensors*, 17(3), 474, doi.org/10.3390/s17030474.

IMAR Navigation GmbH (2016). *Inertial Navigation System iNAV-FJI-LSURV.* Technical report, URL: http://www.imar.de/index.php/en/products/by-product-names (letzter Zugriff: 23.12.2016).

Janßen, J. (2017). *Entropy-based self-calibration of mobile laser scanning systems.* Abschlussbericht zum Masterprojekt Mobile Mapping mit bewegten Multisensorsystemen (unveröffentlicht), Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn.

Janßen, J., Medic, T., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2019). Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design. *Remote Sensing*, 11(7), 845; doi.org/10.3390/rs11070845.

Jelalian, A. V. (1992). *Laser Radar Systems.* Artech-House, Boston, London.

Jian, Z. & Ravani, B. (2016). Boresight Calibration of Mobile Laser Scanner Using an External Fixture. *Journal of Applied Geodesy*, 10(3), 175–183.

Joeckel, R., Stober, M., & Huep, W. (2008). *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren (5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage)*. Wichmann Verlag, Heidelberg.

Kaartinen, H., Hyyppä, J., Kukko, A., Jaakkola, A., & Hyyppä, H. (2012). Benchmarking the Performance of Mobile Laser Scanning Systems Using a Permanent Test Field. *Sensors*, 12(9), 12814–12835, doi.org/10.3390/s120912814.

Kalenjuk, S., Lienhart, W., Rebhan, M. J., & Marte, R. (2019). Large-scale monitoring of retaining structures: new approaches on the safety assessment of retaining structures using mobile mapping. In *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2019, Volume 10970, SPIE Smart Structures + Nondestructive Evaluation 2019, 3-7 March 2019, Denver, Colorado, USA* (pp. 225–234).

KANN GmbH (2020). *KANN Mauerscheiben*. Technical report, URL: https://www.kann.de/service/technische-hilfe/aufbau-mauern/aufbau-mauerscheiben/ (letzter Zugriff: 06.07.2020).

Kassir, A. & Peynot, T. (2010). Reliable Automatic Camera-Laser Calibration. In *Australasian Conference on Robotics & Automation 2010 (ACRA), 1-3 December 2010, Brisbane, Australia* (pp. 209–218).

Keller, F. (2015). *Entwicklung eines forschungsorientierten Multi-Sensor-Systems zum kinematischen Laserscanning innerhalb von Gebäuden*. Dissertation, HafenCity Universität Hamburg.

Keller, F. & Sternberg, H. (2013). Multi-Sensor Platform for Indoor Mobile Mapping: System Calibration and Using a Total Station for Indoor Applications. *Remote Sensing*, 5(11), 5805–5824, doi.org/10.3390/rs5115805.

Kermarrec, G., Neumann, I., Alkhatib, H., & Schön, S. (2019). The stochastic model for Global Navigation Satellite Systems and terrestrial laser scanning observations: A proposal to account for correlations in least squares adjustment. *Journal of Applied Geodesy*, 13(2), 93–104.

Kersten, T., Sternberg, H., & Mechelke, K. (2005). Investigations into the accuracy behaviour of the terrestrial laser scanning system Mensi GS100. In *Optical 3-D Measurement Techniques VII, Vol. I, Vienna, Austria* (pp. 122–131).

Keyetieu, R. & Seube, N. (2019). Automatic Data Selection and Boresight Adjustment of LiDAR Systems. *Remote Sensing*, 11(9), 1087, doi.org/10.3390/rs11091087.

Klingbeil, L., Eling, C., Heinz, E., Wieland, M., & Kuhlmann, H. (2015). Direct Georeferencing for Portable Mapping Systems – In the Air and on the Ground. In *9th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2015), 9-11 December 2015, Sydney, Australia*.

Klingbeil, L., Eling, C., Heinz, E., Wieland, M., & Kuhlmann, H. (2017). Direct Georeferencing for Portable Mapping Systems: In the Air and on the Ground. *Journal of Surveying Engineering*, 143(4), 04017010–1–11.

Klingbeil, L., Eling, C., Zimmermann, F., & Kuhlmann, H. (2014). Magnetic Field Sensor Calibration for Attitude Determination. *Journal of Applied Geodesy*, 8(2), 97–108.

Klingbeil, L., Heinz, E., Wieland, M., Eichel, J., Läbe, T., & Kuhlmann, H. (2019). On the UAV based Analysis of Slow Geomorphological Processes: A Case Study at a Solifluction Lobe in the Turtmann Valley. In *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece*.

Koch, K.-R. (1999). *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models (Second, Updated and Enlarged Edition)*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Kuhlmann, H. & Holst, C. (2017). *Ingenieurgeodäsie – Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*, Kapitel Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning: Messtechnik, flächenhafte Modellierungen und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings, (pp. 167–212). Springer Verlag GmbH Deutschland.

Kuhlmann, H. & Klingbeil, L. (2017). *Ingenieurgeodäsie – Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*, Kapitel Mobile Multisensorsysteme, (pp. 93–129). Springer Verlag GmbH Deutschland.

Kuhlmann, H., Schwieger, V., Wieser, A., & Niemeier, W. (2014). Engineering Geodesy – Definition and Core Competencies. *Journal of Applied Geodesy*, 8(4), 327–333.

Kukko, A., Kaartinen, H., Hyyppä, J., & Chen, Y. (2012). Multiplatform Mobile Laser Scanning: Usability and Performance. *Sensors*, 12(9), 11712–11733, doi.org/10.3390/s120911712.

Kurz, S., Blersch, D., Held, C., Mettenleiter, M., & Fröhlich, C. (2013). Neues profilgebendes 360°-Laserscansystem von Z+F für Mobile Mapping Trägerplattformen. In *Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013* (pp. 194–205). Wichmann Verlag, Berlin.

Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–26.

Lambertus, T., Belton, D., & Helmholz, P. (2018). Empirical Investigation of a Stochastic Model Based on Intensity Values for Terrestrial Laser Scanning. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 125(3), 43–52.

Le Scouarnec, R., Touzé, T., Lacambre, J. B., & Seube, N. (2013). A Positioning Free Calibration Method for Mobile Laser Scanning Applications. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W2, ISPRS Workshop Laser Scanning 2013, 11-13 November 2013, Antalya, Turkey* (pp. 157–162).

Leek, J., Artz, T., & Nothnagel, A. (2015). Optimized scheduling of VLBI UT1 intensive sessions for twin telescopes employing impact factor analysis. *Journal of Geodesy*, 89(9), 911–924.

Leica Geosystems (2020). *Leica Pegasus: Two Mobile Sensorplattform.* Technical report, URL: https://leica-geosystems.com/de-de/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus_two (letzter Zugriff: 06.07.2020).

Lenzmann, L. & Lenzmann, E. (2004). Strenge Auswertung des nichtlinearen Gauß-Helmert-Modells. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 111(2), 68–73.

Levinson, J. & Thrun, S. (2014). Unsupervised Calibration for Multi-beam Lasers. In *Khatib, O., Kumar, V., Sukhatme, G. (Eds.): Experimental Robotics – The 12th International Symposium on Experimental Robotics, Springer Tracts in Advanced Robotics, Volume 79* (pp. 179–193). Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Li, Z., Tan, J., & Liu, H. (2019). Rigorous Boresight Self-Calibration of Mobile and UAV LiDAR Scanning Systems by Strip Adjustment. *Remote Sensing*, 11(4), 442, doi.org/10.3390/rs11040442.

Lichti, D. D. (2007). Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(5), 307–324.

Lichti, D. D. & Licht, M. G. (2006). Experiences with Terrestrial Laser Scanner Modelling and Accuracy Assessment. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology, IAPRS Volume XXXVI, Part 5, 25-27 September 2006, Dresden, Germany* (pp. 155–160).

Lienhart, W., Kalenjuk, S., & Ehrhart, C. (2017). Efficient and Large Scale Monitoring of Retaining Walls along Highways using a Mobile Mapping System. *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 5-8 December, 2017, Brisbane, Australia.*

Lindenthal, S. M., Ussyshkin, V. R., Wang, J. G., & Pokorny, M. (2011). Airborne LIDAR: A Fully-Automated Self-Calibration Procedure. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W12, ISPRS Workshop Laser Scanning 2011, 29-31 August 2011, Calgary, Canada* (pp. 73–78).

Lindstaedt, M., T., K., K., M., & Graeger, T. (2012). Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In *Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012* (pp. 264–275). Wichmann Verlag, Berlin.

Lu, X., Feng, C., Ma, Y., Yang, F., Shi, B., & Su, D. (2019). Calibration method of rotation and displacement systematic errors for ship-borne mobile surveying systems. *Survey Review*, 51(364), 78–86, doi.org/10.1080/00396265.2017.1362731.

Luhmann, T. (2018). *Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen – Methoden – Beispiele (4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage).* Wichmann Verlag, Heidelberg.

Maboudi, M., Bánhidi, D., & Gerke, M. (2018). Investigation of Geometric Performance of an Indoor Mobile Mapping System. In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2, ISPRS TC II Mid-term Symposium Towards Photogrammetry 2020, 4-7 June 2018, Riva del Garda, Italy* (pp. 637–642).

Maddern, W., Harrison, A., & Newman, P. (2012). Lost in Translation (and Rotation): Rapid Extrinsic Calibration for 2D and 3D LIDARs. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 14-19 May 2012, St. Paul, Minnesota, USA* (pp. 3096–3102).

Maddern, W., Pascoe, G., Linegar, C., & Newman, P. (2017). 1 year, 1000 km: The Oxford RobotCar dataset. *The International Journal of Robotics Research*, 36(1), 3–15.

Mao, Q., Zhang, L., Li, Q., Hu, Q., Yu, J., Feng, S., Ochieng, W., & Gong, H. (2015). A Least Squares Collocation Method for Accuracy Improvement of Mobile LiDAR Systems. *Remote Sensing*, 7(6), 7402–7424, doi.org/10.3390/rs70607402.

Martín-Jiménez, J. A., Zazo, S., Justel, J. J. A., Rodríguez-Gonzálvez, P., & González-Aguilera, D. (2018). Road safety evaluation through automatic extraction of road horizontal alignments from Mobile LiDAR System and inductive reasoning based on a decision tree. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 334–346.

Martínez, J. L., Morales, J., Reina, A. J., Mandow, A., Pequeño-Boter, A., & García-Cerezo, A. (2015). Construction and Calibration of a Low-Cost 3D Laser Scanner with 360° Field of View for Mobile Robots. In *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 17-19 March 2015, Seville, Spain* (pp. 149–154).

Martins de Oliveira Junior, E. & Rodrigues dos Santos, D. (2019). Rigorous Calibration of UAV-Based LiDAR Systems with Refinement of the Boresight Angles Using a Point-to-Plane Approach. *Sensors*, 19(23), 5224, doi.org/10.3390/s19235224.

Mattheuwsen, L., Bassier, M., & Vergauwen, M. (2019). Theoretical Accuracy Prediction and Validation of Low-End and High-End Mobile Mapping System in Urban, Residential and Rural Areas. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W18, Optical 3D Metrology, 2-3 December 2019, Strasbourg, France* (pp. 121–128).

Medić, T., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2019). Sensitivity Analysis and Minimal Measurement Geometry for the Target-Based Calibration of High-End Panoramic Terrestrial Laser Scanners. *Remote Sensing*, 11(13), 1519, doi.org/10.3390/rs11131519.

Medić, T., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2020). Designing and Evaluating a User-Oriented Calibration Field for the Target-Based Self-Calibration of Panoramic Terrestrial Laser Scanners. *Remote Sensing*, 12(1), 15, doi.org/10.3390/rs12010015.

Mettenleiter, M. (2020). *Persönliche Mitteilungen per E-Mail (unveröffentlicht).* Zoller & Fröhlich GmbH.

Mettenleiter, M., Härtl, F., Kresser, S., & Fröhlich, C. (2015). *Laserscanning – Phasenbasierte Lasermesstechnik für die hochpräzise und schnelle dreidimensionale Umgebungserfassung.* Die Bibliothek der Technik, Band 371, Süddeutscher Verlag onpact GmbH, München.

Mezian, M., Vallet, B., Soheilian, B., & Paparoditis, N. (2016). Uncertainty Propagation For Terrestrial Mobile Laser Scanner. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B3, XXIII ISPRS Congress, Commission III, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic* (pp. 331–335).

Mikhail, E. M. & Ackermann, F. (1976). *Observations and Least Squares.* Harper & Row Publishers, New York, USA.

Mirzaei, F. M., Kottas, D. G., & Roumeliotis, S. I. (2012). 3D LIDAR-camera intrinsic and extrinsic calibration: Identifiability and analytical least-squares-based initialization. *The International Journal of Robotics Research*, 31(4), 452–467.

Muralikrishnan, B., Ferrucci, M., Sawyer, D., Gerner, G., Lee, V., Blackburn, C., Phillips, S., Petrov, P., Yakovlev, Y., Astrelin, A., Milligan, S., & Palmateer, J. (2015). Volumetric performance evaluation of a laser scanner based on geometric error model. *Precision Engineering*, 40, 139–150.

Naroditsky, O., Patterson, A., & Daniilidis, K. (2011). Automatic Alignment of a Camera with a Line Scan LIDAR System. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 9-13 May 2011, Shanghai, China* (pp. 3429–3434).

Neitzel, F., Gordon, B., & Wujanz, D. (2014). *Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS).* Technical report, DVW-Merkblatt 7-2014, URL: https://www.dvw.de/veroeffentlichungen/merkblaetter (letzter Zugriff: 06.07.2020).

Neitzel, F. & Neumann, I. (2013). Scanning in Motion – Kinematisches TLS mittels mobiler Plattformen. In *DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2013 (TLS 2013), Schriftenreihe des DVW, Band 72* (pp. 89–106). Wißner-Verlag, Augsburg.

Niemeier, W. (2008). *Ausgleichungsrechnung – Statistische Auswertemethoden (2., überarbeitete und erweiterte Auflage).* de Gruyter Verlag, Berlin, New York.

Nothnagel, A., Springer, A., Heinz, E., Artz, T., & de Vincente, P. (2014). Gravitational deformation effects: The Yebes 40 m telescope case. In *Behrend, D., Baver K. D., Armstrong, K. L. (Eds.): International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2014 General Meeting Proceedings: "VGOS: The New VLBI Network", Science Press, Beijing, China* (pp. 158–162).

NovAtel Inc (2019). *Waypoint Inertial Explorer 8.80 Post Processing Software.* Technical report, URL: http://www2.novatel.com/waypointrelease (letzter Zugriff: 19.10.2019).

Nüchter, A., Borrmann, D., Elseberg, J., & Redondo, D. (2015a). A Backpack-mounted 3D Mobile Scanning System. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 122(10), 301–307.

Nüchter, A., Borrmann, D., Koch, P., Kühn, M., & May, S. (2015b). A Man-Portable, IMU-Free Mobile Mapping System. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-3/W5, ISPRS Geospatial Week 2015, 28 September - 3 October 2015, La Grande Motte, France* (pp. 17–23).

Olsen, M. J., Roe, G. V., Glennie, C., Persi, F., Reedy, M., Hurwitz, D., Williams, K., Tuss, H., Squellati, A., & Knodler, M. (2013). *Guidelines for the Use of Mobile LIDAR in Transportation Applications.* Technical report, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 748.

Paffenholz, J.-A., Alkhatib, H., Stenz, U., & Neumann, I. (2017). Aspekte der Qualitätssicherung von Multi-Sensor-Systemen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 124(4), 79–91.

Pandey, G., McBride, J., Savarese, S., & Eustice, R. (2010). Extrinsic Calibration of a 3D Laser Scanner and an Omnidirectional Camera. In *7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Volume 43, Issue 16* (pp. 336–341).

Pfeifer, N., Höfle, B., Briese, C., Rutzinger, M., & Haring, A. (2008). Analysis of the Backscattered Energy in Terrestrial Laser Scanning Data. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVII-B5, XXI ISPRS Congress, Commission V, 3-11 July 2008, Beijing, China* (pp. 1045–1052).

Pfeifer, N., Mandlburger, G., & Glira, P. (2017). *Photogrammetrie und Fernerkundung – Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*, Kapitel Laserscanning, (pp. 431–481). Springer Verlag GmbH Deutschland.

Puente, I., Akinci, B., González-Jorge, H., Díaz-Vilariño, L., & Arias, P. (2016). A semi-automated method for extracting vertical clearance and cross sections in tunnels using mobile LiDAR data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 59, 48–54.

Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, 46(7), 2127–2145.

Ravi, R., Shamseldin, T., Elbahnasawy, M., Lin, Y.-J., & Habib, A. (2018). Bias Impact Analysis and Calibration of UAV-Based Mobile LiDAR System With Spinning Multi-Beam Laser Scanner. *Applied Sciences*, 8(2), 297, doi.org/10.3390/app8020297.

Riecken, J. & Kurtenbach, E. (2017). Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung – SAPOS®. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*, 142(5), 293–300.

Rieger, P., Studnicka, N., Pfennigbauer, M., & Zach, G. (2010). Boresight alignment method for mobile laser scanning systems. *Journal of Applied Geodesy*, 4(1), 13–21.

Rivera-Castillo, J., Flores-Fuentes, W., Rivas-López, M., Sergiyenko, O., Gonzalez-Navarro, F. F., Rodríguez-Quiñonez, J. C., Hernández-Balbuena, D., Lindner, L., & Básaca-Preciado, L. C. (2017). Experimental image and range scanner datasets fusion in SHM for displacement detection. *Structural Control Health Monitoring*, 24(10), e1967, doi.org/10.1002/stc.1967.

Schabenberger, O. & Gotway, C. A. (2005). *Statistical Methods for Spatial Data Analysis*. Chapman & Hall/CRC, New York.

Schiele, O. J. (2005). *Ein operationelles Kalibrierverfahren für das flugzeuggetragene Laserscannersystem ScaLARS*. Dissertation, Universität Stuttgart.

Schlichting, A., Brenner, C., & Schön, S. (2014). Bewertung von Inertial/GNSS-Modulen mittels Laserscannern und bekannter Landmarken. *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2014(1), 5–15.

Schmitz, B., Holst, C., Medic, T., Lichti, D. D., & Kuhlmann, H. (2019). How to Efficiently Determine the Range Precision of 3D Terrestrial Laser Scanners. *Sensors*, 19(6), 1466, doi.org/10.3390/s19061466.

Schwarz, W. & Hennes, M. (2017). *Ingenieurgeodäsie – Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*, Kapitel Qualitätsbewertungen in der Ingenieurgeodäsie, (pp. 371–402). Springer Verlag GmbH Deutschland.

Seube, N., Levilly, S., & de Jong, K. (2016). Automatic Estimation of Boresight Angles Between IMU and Multi-Beam Echo Sounder Systems. In *Zerr, B. et al. (Eds.): Quantitative Monitoring of the Underwater Environment – Results of the International Marine Science and Technology Event MOQESM´14 in Brest, France, Ocean Engineering & Oceanography, Volume 6* (pp. 13–23). Springer International Publishing, Switzerland.

Shan, J. & Toth, C. K. (2018). *Topographic Laser Ranging and Scanning – Principles and Processing, Second Edition*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York.

Sheehan, M., Harrison, A., & Newman, P. (2010). Automatic Self-Calibration Of a Full Field-Of-View 3D n-Laser Scanner. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Experimental Robotics (ISER2010), 18-21 December 2010, New Delhi and Agra, India*.

Sheehan, M., Harrison, A., & Newman, P. (2012). Self-calibration for a 3D laser. *The International Journal of Robotics Research*, 31(5), 675–687.

Skaloud, J. & Lichti, D. (2006). Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(1), 47–59.

Skaloud, J. & Schaer, P. (2007). Towards Automated LIDAR Boresight Self-Calibration. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI-5/C55, 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT '07), 29-31 May 2007, Padua, Italy*.

Soilán, M., Sánchez-Rodríguez, A., del Río-Barral, P., Perez-Collazo, C., Arias, P., & Riveiro, B. (2019). Review of Laser Scanning Technologies and Their Applications for Road and Railway Infrastructure Monitoring. *Infrastructures*, 4(4), 58, doi.org/10.3390/infrastructures4040058.

Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., & Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(4), 389–399.

Soudarissanane, S. S. (2016). *The Geometry of Terrestrial Laser Scanning – Identification of Errors, Modeling and Mitigation of Scanning Geometry*. Dissertation, Delft University of Technology.

Stachniss, C. (2017). *Photogrammetrie und Fernerkundung – Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*, Kapitel Simultaneous Localization and Mapping, (pp. 293–320). Springer Verlag GmbH Deutschland.

Stenz, U., Hartmann, J., Paffenholz, J.-A., & Neumann, I. (2017). A Framework Based on Reference Data with Superordinate Accuracy for the Quality Analysis of Terrestrial Laser Scanning-Based Multi-Sensor-Systems. *Sensors*, 17(8), 1886, doi.org/10.3390/s17081886.

Stenz, U., Hartmann, J., Paffenholz, J.-A., & Neumann, I. (2020). High-Precision 3D Object Capturing with Static and Kinematic Terrestrial Laser Scanning in Industrial Applications – Approaches of Quality Assessment. *Remote Sensing*, 12(2), 290, doi.org/10.3390/rs12020290.

Sternberg, H., Keller, F., & Willemsen, T. (2013). Precise indoor mapping as a basis for coarse indoor navigation. *Journal of Applied Geodesy*, 7(4), 231–246.

Strübing, T. (2016). *Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München.

Strübing, T. & Neumann, I. (2013). Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*, 138(3), 210–221.

Talaya, J., Alamus, R., Bosch, E., Serra, A., Kornus, W., & Baron, A. (2004). Integration of a Terrestrial Laser Scanner with GPS/IMU Orientation Sensors. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXV-B5, XX ISPRS Congress, Commission V, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey* (pp. 1049–1055).

Teunissen, P. J. G. & Montenbruck, O., Eds. (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer International Publishing, Switzerland.

Titterton, D. H. & Weston, J. L. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology – 2nd Edition*. The Institution of Electrical Engineers, Stevenage, Hertfordshire, United Kingdom & The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, USA.

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. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W4, 3D-Arch 2015 – 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 25-27 February 2015, Avila, Spain* (pp. 245–253).

Trimble Inc. (2020). *Trimble MX9 Mobile Mapping-System*. Technical report, URL: https://de.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-mx9 (letzter Zugriff: 06.07.2020).

Tsai, G. J., Chiang, K. W., & El-Sheimy, N. (2018). Kinematic Calibration Using Low-Cost LiDAR System for Mapping and Autonomous Driving Applications. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-1, ISPRS TC I Midterm Symposium Innovative Sensing – From Sensors to Methods and Applications, 10-12 October 2018, Karlsruhe, Germany* (pp. 445–450).

Tucci, G., Visintini, D., Bonora, V., & Parisi, E. I. (2018). Examination of Indoor Mobile Mapping Systems in a Diversified Internal/External Test Field. *Applied Science*, 8(3), 401, doi.org/10.3390/app8030401.

Unnikrishnan, R. & Hebert, M. (2005). *Fast Extrinsic Calibration of a Laser Rangefinder to a Camera*. Technical report, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

Vennegeerts, H. (2011). *Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung für Mobile-Mapping-Systeme*. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Vennegeerts, H., Martin, J., Becker, M., & Kutterer, H. (2008). Validation of a kinematic laserscanning system. *Journal of Applied Geodesy*, 2(2), 79–84.

Verma, S., Berrio, J. S., Worrall, S., & Nebot, E. (2019). Automatic extrinsic calibration between a camera and a 3D Lidar using 3D point and plane correspondences. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), 27-30 October 2019, Auckland, New Zealand* (pp. 3906–3912).

Voegtle, T., Schwab, I., & Landes, T. (2008). Influences of Different Materials on the Measurements of a Terrestrial Laser Scanner (TLS). In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVII-B5, XXI ISPRS Congress, Commission V, 3-11 July 2008, Beijing, China* (pp. 1061–1066).

Vogel, S. (2020). *Kalman Filtering with State Constraints Applied to Multi-sensor Systems and Georeferencing*. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Vosselman, G. & Maas, H.-G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. CRC Press, Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland.

Wang, J., Hu, Z., Chen, Y., & Zhang, Z. (2017). Automatic Estimation of Road Slopes and Superelevations Using Point Clouds. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 83(3), 217–223.

Wang, Y., Chen, Q., Zhu, Q., Liu, L., Li, C., & Zheng, D. (2019). A Survey of Mobile Laser Scanning Applications and Key Techniques over Urban Areas. *Remote Sensing*, 11(13), 1540, doi.org/10.3390/rs11131540.

Wendel, J. (2011). *Integrierte Navigationssysteme – Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation (2. überarbeitete Auflage)*. Oldenbourg Verlag, München.

Williams, K., Olsen, M. J., Gene, V. R., & Glennie, C. (2013). Synthesis of Transportation Applications of Mobile LIDAR. *Remote Sensing*, 5(9), 4652–4692, doi.org/10.3390/rs5094652.

Witte, B. & Sparla, P. (2015). *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen (8., neu bearbeitete und erweiterte Auflage)*. Wichmann Verlag, Heidelberg.

Woschitz, H. & Heister, H. (2017). *Ingenieurgeodäsie – Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*, Kapitel Überprüfung und Kalibrierung der Messmittel in der Geodäsie, (pp. 403–461). Springer Verlag GmbH Deutschland.

Wujanz, D., Burger, M., Mettenleiter, M., & Neitzel, F. (2017). An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 125, 146–155.

Wujanz, D., Burger, M., Tschirschwitz, F., Nietzschmann, T., Neitzel, F., & Kersten, T. P. (2018). Determination of Intensity-Based Stochastic Model for Terrestrial Laser Scanners Utilising 3D-Point Clouds. *Sensors*, 18(7), 2187, doi.org/10.3390/s18072187.

Wunderlich, T., Wasmeier, P., Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T., & Reidl, F. (2013). *Objective Specifications of Terrestrial Laserscanners – A Contribution of the Geodetic Laboratory at the Technische Universität München*. Technical report, Blue Series Books at the Chair of Geodesy, Volume 21, Technische Universität München.

Yin, D., Liu, J., Wu, T., Liu, K., Hyyppä, J., & Chen, R. (2018). Extrinsic Calibration of 2D Laser Rangefinders Using an Existing Cuboid-Shaped Corridor as the Reference. *Sensors*, 18(12), 4371, doi.org/10.3390/s18124371.

Zámečníková, M. & Neuner, H. (2017). Investigation of the Distance Dependence of the Combined Influence of the Incidence Angle and the Surface Roughness on the Reflectorless Distance Measurement of a Scanning Total Station. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 124(11-12), 353–361.

Zámečníková, M., Neuner, H., Pegritz, S., & Sonnleitner, R. (2015). Investigation on the influence of the incidence angle on the reflectorless distance measurement of a terrestrial laser scanner. *Vermessung & Geoinformation*, 2015(2-3), 208–218.

Zámečníková, M., Wieser, A., Woschitz, H., & Ressl, C. (2014). Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy*, 8(4), 311–325.

Zeimetz, P. (2010). *Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn.

Zhang, Q. & Pless, R. (2004). Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder (Improves Camera Calibration). In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 28 September - 2 October 2004, Sendai, Japan* (pp. 2301–2306).

Zoller & Fröhlich GmbH (2020). *Z+F PROFILER® 9012, 2D Laserscanner*. Technical report, URL: https://www.zf-laser.com/Z-F-PROFILER-R-9012.2d_laserscanner.0.html (letzter Zugriff: 06.07.2020).