

Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 905

Jens Hartmann

Hochgenaue 3D-Erfassung von Großstrukturen durch kinematisches terrestrisches Laserscanning

München 2023

Bayerische Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5317-5

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover ISSN 0174-1454, Nr. 388, Hannover 2023



Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 905

Hochgenaue 3D-Erfassung von Großstrukturen durch kinematisches terrestrisches Laserscanning

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jens Hartmann

geboren am 06.01.1981 in Brandenburg an der Havel

München 2023

Bayerische Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5317-5

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:

Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover ISSN 0174-1454, Nr. 388, Hannover 2023 Adresse der DGK:

Воск

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

Prüfungskommissio	in:
Vorsitzender:	Prof. DrIng. Jürgen Müller
Referent:	Prof. DrIng. Ingo Neumann
Korreferenten:	Prof. DrIng. Steffen Schön Prof. Dr. Alexander Reiterer (Albert-Ludwigs-Universität Freiburg)
Tag der mündlicher	n Prüfung: 28.02.2023

© 2023 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

Kurzfassung

Die 3D-Objekterfassung ist eine der Kernaufgaben der Ingenieurgeodäsie bzw. der Industrievermessung. Insbesondere Objekte mit einer Ausdehnung von > 100 m (Großstrukturen) sind eine Herausforderung. Zu nennen sind insbesondere örtliche Gegebenheiten, welche sich aus der Produktionsumgebung ergeben. Hierzu gehören z. B. Störeinflüsse (Vibrationen) und beengte Platzverhältnisse. Hinzu kommen Forderungen aus der Fertigung, hierzu zählen eine effiziente Erfassung und Überprüfung der Daten. Hieraus resultieren erhöhte Anforderungen an Messtechnik und Datenprozessierung. Beispielhaft sind eine beschleunigte Erfassung und die Qualitätssicherung zu nennen. Zur Erfassung von Großstrukturen hat sich das Terrestrisches Laserscanning (TLS) als eines der Standardverfahren etabliert. Aufgrund seiner höheren Effizienz gegenüber dem statisches terrestrisches Laserscanning (s-TLS) ist speziell das kinematisches terrestrisches Laserscanning (k-TLS) geeignet. Für die Qualitätsbewertung stellt die Genauigkeit ein wesentliches Maß dar. Um auch kleinste Produktionsabweichungen zu detektieren wird für die Arbeit eine Messgenauigkeit mit $\sigma_{3D} \leq 1$ mm, spezifiziert als Helmertscher 3D-Punktfehler, festgelegt. Hieraus ist ersichtlich, dass eine k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung eine besondere Herausforderung darstellt. Die wesentlichsten Teilschritte sind die 3D-Objekterfassung durch den Laserscanner, die Systemkalibrierung und Synchronisierung sowie die Georeferenzierung. Um die Anforderung an die Gesamtgenauigkeit zu erreichen, müssen die Genauigkeiten der Teilschritte entsprechend gering sein. Das verwendete k-TLS-basiertes Multi-Sensor-System (MSS) besteht aus einem Laserscanner (Zoller+Fröhlich (Z+F) IMAGER 5010) an welchem eine Leica T-Probe moniert ist. Hieraus resultiert, dass die 6 Degree of Freedom (DoF) zwischen dem Laserscanner und der T-Probe zu bestimmen sind. Dies erfolgt durch eine Systemkalibrierung. Zur Anwendung kommt ein Referenzgeometrien (RG)basierter Ansatz. Da die Anordnung der RG für die Bestimmung der 6 DoF eine wichtige Rolle spielt, werden die RG im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation (MCS) optimiert. Als RG kommen Referenzebenen (RE) und Zylinder zum Einsatz. Basierend auf der MCS wird je eine optimierte Konstellation mit RE und Zylinder vorgestellt. Zur Vereinfachung bzw. Automatisierung der Suche nach der optimalen Konstellation kommt ein Genetischer Algorithmus (GA) zum Einsatz. Als praktische Realisierung wird eine Kalibrierumgebung auf Basis von elf RE installiert. Hierauf werden Messung mit einem Z+F IMAGER 5010 und 5016 durchgeführt.

Die Objekterfassung mit dem Laserscanner erfolgt im Profilmodus. Für die Synchronisierung wird bei jedem Nulldurchgang des Profils ein Triggersignal erzeugt und per Kabel an den Lasertracker (Leica AT960) übertragen. Nach Eingang führt dieser eine Georeferenzierungsmessung zur T-Probe aus. Hierdurch werden die 6 DoF zwischen Lasertracker und T-Probe direkt bestimmt. Die 6 DoF gelten nur für den ersten Punkt im Profil. Da dieses jedoch aus mehreren Punkten besteht, ist die Bewegung innerhalb eines Profils auf alle folgenden Punkte zu übertragen. Die Prädiktion erfolgt im Rahmen eines implementierten Extended Kalman Filter (EKF). Um eine mögliche höhere Dynamik der Plattform zu berücksichtigen, werden neben den 6 DoF und den jeweiligen Geschwindigkeiten auch Beschleunigungen in den Zustandsvektor aufgenommen.

Zur Bewertung der Qualität der Objekterfassung mit dem k-TLS-basierten MSS wird die Gesamtunsicherheit im Rahmen einer Vorwärtsmodellierung bestimmt. Diese erfolgt durch eine MCS. Grundlage hierfür bilden die Unsicherheiten der beschriebenen Einzelschritte. Die Unsicherheiten werden entsprechend vorab bestimmt und spezifiziert. Zur Validierung der modellierten Gesamtunsicherheiten und gefilterten Punktwolken aus der Georeferenzierung wird eine Rückwärtsmodellierung durchgeführt. Hierfür werden hochgenaue Referenzdaten verwendet, welche mit einer Leica T-Scan erfasst wurden. Abschließend ist festzuhalten, dass die geforderten Genauigkeit für eine 3D-Objekterfassung mit dem verwendeten k-TLS-basierte MSS eingehalten werden kann. Hierfür sollten jedoch die ermittelten Einzelunsicherheiten nicht überschritten werden. Die Entfernung zwischen Objekt und Laserscanner sollte unter 10 m liegen.

Stichworte: Industrievermessung, Multi-Sensor-Systeme, kinematisches terrestrisches Laserscanning, Systemkalibrierung, Georeferenzierung, Unsicherheitsmodellierung

Abstract

3D object capturing is one of the main tasks in engineering geodesy or industrial surveying. Especially objects with an extension of > 100 m (large structures) are a challenge. Particularly local conditions, which result from the production environment, are to be mentioned. These include, for example, disturbances (vibrations) and confined space. In addition, there are requirements from production, including efficient data acquisition and verification. This results in increased demands on measurement technology and data processing. For example accelerated data acquisition and quality assurance are to be mentioned.

For the capture of large structures, terrestrial laser scanning TLS has established itself as one of the standard methods. Due to its higher efficiency compared to the static terrestrial laser scanning s-TLS, the kinematic terrestrial laser scanning k-TLS is particularly suitable. For quality assessment, accuracy represents an essential measure. In order to capture even the smallest production deviations, a measurement accuracy with $\sigma_{3D} \leq 1$ mm, specified as Helmert 3D point error, is defined. From this, it can be seen that k-TLS-based 3D object capturing is particularly challenging. The most essential substeps are 3D object capturing by the laser scanner, system calibration and synchronization as well as georeferencing. In order to achieve the requirement for overall accuracy, the accuracies of the substeps must be correspondingly low. The used k-TLS-based multi-sensorsystem MSS consists of a laser scanner (Z+F IMAGER 5010) on which a Leica T-Probe is mounted. As a result, the 6 DoF between the laser scanner and the T-Probe have be determined. This is done by a system calibration. For this a reference geometry RG-based approach is used. Since the arrangement of the RG plays an important role for the determination of the 6 DoF, the RG are optimized within a Monte-Carlo simulation MCS. As RG cylinders and reference planes (RP) are used. Based on the MCS, an optimized constellation for the (RP) and cylinder is presented respectively. To simplify or automate the search for the optimal constellation, a genetic algorithm GA is used. As a practical realization, a calibration environment based on eleven (RP) is installed. On this, measurements with a Z+F IMAGER 5010 and 5016 are carried out.

Object capturing with the laser scanner is performed in profile mode. For synchronization, a trigger signal is generated at each zero crossing of the profile and transmitted by cable to the laser tracker (Leica AT960). Upon receipt, the laser tracker performs a georeferencing measurement to the T-Probe. This enables a direct determination of the 6 DoF between the laser tracker and the T-Probe. The 6 DoF are only valid for the first point in the profile. However, since this consists of several points, the movement within a profile is to be transferred to all following points. The prediction is done in the context of an implemented extended Kalman filter EKF. To account for possible higher dynamics of the platform, accelerations are included in the state vector in addition to the 6 DoF and the respective velocities.

To evaluate the quality of object capturing with the k-TLS-based MSS, the overall uncertainty is determined in the context of forward modeling. Therefor a MCS is used. This is based on the uncertainties of the described individual steps. The uncertainties are determined and specified accordingly in advance. For the validation of the modeled total uncertainties and filtered point clouds from the georeferencing, a backward modeling is performed. For this purpose, highly accurate reference data are used, which were acquired with a Leica T-Scan. Finally, it can be stated that the required accuracy for a 3D object capturing can be met with the used k-TLS-based MSS. However, the determined individual uncertainties should not be exceeded for this purpose. The distance between the object and the laser scanner should be less than 10 m.

Keywords: Industrial surveying, multi-sensor-systems, kinematic terrestrial laser scanning, system calibration, georeferencing, uncertainty modeling.

Abkürzungsverzeichnis

AIFM	Absolutinterferometermessung				
\mathbf{ADM}	Absolutdistanzmessung				
ALS	Airborne Laserscanning				
ASTM	American Society for Testing and Materials				
BIM	Building Information Modeling)				
\mathbf{BF}	Brute Force				
CAD	Computer-aided Design				
\mathbf{CCR}	Corner Cube Reflector				
\mathbf{CMM}	Coordinate Measuring Machines				
\mathbf{DoF}	Degree of Freedom				
\mathbf{EDM}	Elektro-Optische Distanzmessung				
\mathbf{FoV}	Field of View				
\mathbf{GA}	Genetischer Algorithmus				
GIH	Geodätisches Institut Hannover				
\mathbf{GHM}	Gauß-Helmert-Modell				
\mathbf{GMM}	Gauß-Markov-Modell				
GNSS	Global Navigation Satellite System				
\mathbf{GUM}	Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement				
HDR	High Dynamic Range				
ICP	Iterative Closest Point				
\mathbf{EKF}	Extended Kalman Filter				
iEKF	Iterated Extended Kalman Filter				
\mathbf{IFM}	Interferometermessung				
IMU	Inertial Measurement Unit				
\mathbf{IPM}	Institut für Physikalische Messtechnik				
ISO	International Organization for Standardization				
KF	Kalman-Filter				
\mathbf{KGM}	Kalman-Gain-Matrix				
\mathbf{KMG}	Koordinatenmessgerät				
k-TLS	kinematisches terrestrisches Laserscanning				
LIDAR	Light Detection and Ranging				
LED	Light-emitting Diode				
LOA	Level of Accuracy				
M3C2	Multiscale Model to Model Cloud Comparison				
MCS	Monte-Carlo-Simulation				
MkQ	Methode der kleinsten Quadrate				
MPE	Maximum Permissible Error				
MSS	Multi-Sensor-System				
PPS	Puls pro Sekunde				
PPM	Parts per Million				
KANSAC	C Random Sample Consensus				
KE DC	Keierenzebenen				
KG DMS	Reierenzgeometrien				
KMS DMCE	Koot-mean-square				
RIVISE	Root Mean Square Error				

\mathbf{rps}	Rounds per Second
\mathbf{SfM}	Structure from Motion
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
s-TLS	statisches terrestrisches Laserscanning
TIN	Triangulated Irregular Network
TLS	Terrestrisches Laserscanning
T-Mac	Tracker-Machine control Sensor
\mathbf{TTL}	Transistor-Transistor-Logik
ToF	Time of Flight
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
\mathbf{VF}	Varianz-Fortpflanzung
VKM	Varianz-Kovarianz-Matrix
WDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
WFD	Waveform-Digitizing
$\mathbf{Z}\mathbf{+F}$	Zoller+Fröhlich

Inhaltsverzeichnis

1	Einl	eitung		1	
	1.1	Motiva	ntion	2	
	1.2	1.2 Zielsetzung und eigene Beiträge			
	1.3 Gliederung der Arbeit				
2	3D-	Objekte	erfassung in der industriellen Fertigung von Großstrukturen	7	
	2.1	Beding	gungen und Anforderungen in der industriellen Fertigung	7	
	2.2	Grund	lagen zu Qualitätsmaßen und -parametern	10	
	2.3	Überbl	lick Methoden der 3D-Objekterfassung	12	
	2.4	Terrest	trisches Laserscanning	14	
		2.4.1	Messprinzip und Sensorik	15	
		2.4.2	Sensorkalibrierung	17	
		2.4.3	Messunsicherheiten	18	
	2.5	Statisc	thes terrestrisches Laserscanning und Lasertracking	21	
		2.5.1	Vorbereitung und Objektaufnahme	21	
		2.5.2	Datenprozessierung	22	
		2.5.3	Validierung und Qualitätssicherung	25	
		2.5.4	Tachymeter und Lastertracker mit Scanfunktion	26	
		2.5.5	Stopp-und-Go Verfahren	28	
		2.5.6	Resümee zum statischen Laserscanning	29	
	2.6	Kinem	atisches terrestrisches Laserscanning	29	
		2.6.1	Messprinzip und Stand der Entwicklungen	29	
		2.6.2	Arten der Georeferenzierung	31	
		2.6.3	Resümee zum Einsatz des kinematischen terrestrischen Laserscanning	32	
	2.7	Hochge	enaues kinematisches terrestrisches Laserscanning im industriellen Umfeld $\ .$.	34	
		2.7.1	TLS-basierte 3D-Objekterfassung	35	
		2.7.2	Systemkalibrierung und Synchronisierung der Sensoren	35	
		2.7.3	Georeferenzierung der Plattform	37	
		2.7.4	Darstellung des k-TLS-basierten Multi-Sensor-System	39	
2	N / - 1			41	
3			sche Grundlagen	41	
	ა.1 იი	Kaumi Matha	Icne Heimert-Transformation	41	
	3.2	Metho	Center Unsicherneits-Modellierung	43	
		3.2.1 2.2.2	Statistische Grundlagen	43	
		3.2.2 2.9.2	Darstellung nach dem Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement	40	
		3.2.3	Nethoden der Unsicherheitsfortphänzung	41	
			3.2.3.1 Varianziortphanzung	41	
	<u></u>	D	3.2.3.2 Monte-Carlo-Simulation	48	
	ა.ა ე_4	Param	eterschatzung im Gaub-Heimert-Modell	50 50	
	5.4	nauml	Augleichungsmedell	52 52	
		3.4.1 2.4.9	Ausgleichungsmödell	03 F 4	
		5.4.2 2.4.2	Massinzierung	54 57	
		5.4.3 2.4.4	Ausgieichende Ebene Elishen erreiten Graden	55 50	
		0.4.4	riachen zweiten Grades	-90	

	3.5	Filterung
		3.5.1 Das Kalmanfilter
		3.5.2 Das Extended Kalmanfilter
		3.5.3 Das iterative Extended Kalmanfilter
4	Svst	temkalibrierung 61
-	4.1	Strategien und Ansätze
	4.2	Darstellung des Referenzgeometrie-basierten Ansatzes
		4.2.1 Schaffung Kalibrierungebung - Bestimmung der Referenzgeometrien 66
		4.2.2 Objekterfassung und Verknüpfung der Koordinatensysteme 67
		4.2.2 Objekterhassung und Verknupfung der Robrumatensysteme
	13	Anordnung der Referenzgeometrien 71
	4.0	A 3 1 Sonsitivität der Parameter 72
		4.3.1 Sensitivitat del l'atameter
		4.3.2 Incoretische vorbetrachtungen
		4.3.5 Implementer ung einer Simulationsumgebung
	4 4	4.5.4 Optimierung der Reierenzgeometrieanordnung
	4.4	Praktische Realisierung und Durchfuhrung
		4.4.1 Realisierung einer Kalibrierumgebung
		4.4.2 Durchfuhrung der Systemkalibrierung
		4.4.3 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse
5	Geo	referenzierung der mobilen Plattform 99
	5.1	Strategien und Ansätze
	5.2	Messtechnischer Ablauf
		5.2.1 Methode einer punktweisen Georeferenzierung
	5.3	Filtermodell
		5.3.1 Vorbetrachtungen und Modellwahl
		5.3.2 Implementierung 107
	5.4	Messprozess und Datenauswertung 111
	0.1	5.4.1 Messtechnische Umsetzung 111
		5.4.2 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse 113
	5.5	Zusammenfassung und Resümee
6		dierung und Qualitätssicherung 123
	0.1	Strategien und Ansatze
	6.2	Genaugkeitsuntersuchungen der Lasertrackermessung zur T-Probe
		6.2.1 Messstrategie und Auswertung
		$6.2.2 \text{Ergebnisse} \dots \dots$
		6.2.3 Fazit
	6.3	Betrachtung der Unsicherheiten der Einzelschritte
		6.3.1 Objekterfassung durch den Laserscanner
		6.3.2 Systemkalibrierung zwischen T-Probe und Laserscanner
		6.3.3 Georeferenzierung der mobilen Plattform
		6.3.4 Zusammenstellung der Unsicherheiten für die Einzelschritte
	6.4	Modellierung der Gesamtunsicherheit
		6.4.1 Umsetzung der Vorwärtsmodellierung
		6.4.2 Darstellung der Ergebnisse
		6.4.3 Korrelationen
	6.5	Validierung der Modellierungsergebnisse
		6.5.1 Rückwärtsmodellierung
		6.5.2 Bewertung der Ergebnisse

7	Zusammenfassung und Ausblick	147
Α	Anhang	151 151
	A.2 Kapitel 4	$151 \\ 151$
	A.3 Kapitel 5	153
	A.4 Kapitel 6	161
Lit	ceraturverzeichnis	165
At	bildungsverzeichnis	183
Та	bellenverzeichnis	187
Le	benslauf	189

1 Einleitung

Die Objekterfassung stellt einen sehr zentralen Aspekt in der Ingenieurgeodäsie und Industrievermessung dar. Sie ist die Grundlage für eine Vielzahl von Folgeprozessen, hierzu gehören z.B. die 3D-Objektmodellierung oder die Ermittelung des Bauwerkszustandes. Ein weiteres klassisches geodätisches Betätigungsfeld stellt die Deformationsanalyse dar, auch hier ist die Grundlage die Objekterfassung, welche in einer Dimension (1D), 2D oder 3D erfolgen kann. Wird der zeitliche Aspekt mit beachtet, so wird oft die Bezeichnung 4D verwendet. Das TLS hat sich in den letzten Jahren als eine schnelle und effiziente Methode für die flächenhafte Objekterfassung etabliert. Hierbei werden durch einen Laserscanner, welcher nach dem polaren Messverfahren arbeitet, je nach Messmodus 2D- oder 3D-Koordinaten bestimmt. In den wenigsten Fällen, ist die reine Erfassung der Objekte das konkrete Ziel. Meist handelt es ich um weiterführende Zielstellungen. Ein Beispiel ist die Qualitätssicherung, bei welcher die erfassten Daten basierend auf vorab definierten Kriterien bewertet werden. Beispiele hierfür sind Ebenheitsbedingungen oder Abstandsmaße. Der industriellen Messtechnik kommt hierbei eine zentrale Rolle zu. Speziell auf dem Gebiet der industriellen Fertigung gilt Deutschland als ein sehr hochtechnologisierter und innovativer Standort. Um diese Stellung zu sichern bzw. noch weiter auszubauen, werden eine zunehmende Digitalisierung und Automatisierung in der industriellen Fertigung angestrebt (Industrie 4.0). Ein Beispiel ist die Fertigung von Großstrukturen, hierzu gehören z. B. Schiffen, Flugzeugen oder Fertigungsstraßen. Hierbei handelt es sich um einen sehr komplexen Gesamtfertigungsprozess, welcher aus vielen Einzelschritten besteht und wobei zum Teil strenge zeitliche Vorgaben eingehalten werden müssen. Daher liegt es nahe, die einzelnen Schritte möglichst zu automatisieren und schließlich zu beschleunigen. Dies darf natürlich nicht zu Lasten der Qualität gehen. Darunter ist zu verstehen, dass die Vorgaben bezüglich Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit einzuhalten sind. Mängel bedeuten dann kostspieligen Nacharbeiten und führen zum zeitlichen Verzug.

Ein konkretes Beispiel aus der Wirtschaft ist der Bau von Megayachten, welche zum Teil eine Länge von bis zu 200 m erreichen können. Die Gestaltung der äußeren Bereiche erfolgt in einem sehr aufwendigen manuellen Spachtelprozess, bevor sich die Lackierung anschließt. Die Dauer des Beschichtungsprozesses kann bis zu 12 Monate je Yacht betragen und zu Kosten in Millionenhöhe führen. Der 3D-Objekterfassung kommt dabei der zentrale Aspekt der Überprüfung der einzelnen Produktionsschritte im Sinne einer Qualitätssicherung zu. Hierbei erfolgt ein Vergleich zwischen dem IST-Zustand (Aufmaß) mit den SOLL-Daten, welche aus der Konstruktion vorliegenden. Im Rahmen des Auswerteprozesses werden die Daten systematisch analysiert, bewertet und aufbereitet. Darauf aufbauend wird eine optimierte Sollgeometrie abgeleitet, welche abschließend durch den Konstrukteur optimiert wird (Gierschner u. a., 2021). Werden die vorgegebenen geometrischen Vorgaben (Toleranzen) nicht eingehalten, so sind die entsprechenden Produktionsschritte zu wiederholen und zum Teil sehr aufwendige Nacharbeiten zu tätigen. Die Ästhetik, hierzu zählen beispielsweise die Ebenheit und die Einhaltung von vorgegebenen Krümmungsradien, spielt eine sehr entscheidende Rolle. Da schon kleinste Ungenauigkeiten, wie z. B. Sprünge, den ästhetischen Eindruck schmälern, sind entsprechend strenge Vorgaben an die Genauigkeit der Objekterfassung zu formulieren. Einen weiteren Aspekt stellen Materialkosten dar. Um diese möglichst gering zu halten, ist eine sehr genaue und detaillierte Kenntnis der Oberflächen nötig. Daher wird hier als Zielvorgabe für die 3D-Objekterfassung eine Genauigkeit von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm, hier als Helmertscher Punktfehler in 3D spezifiziert, abgeleitet (Hartmann u. a., 2018a).

Neben der Genauigkeit ist als weitere wesentliche Forderungen die Effizienz zu nennen. Um die hohen Anforderungen bei der 3D-Objekterfassung zu erreichen, müssen zum Teil alle weiteren Produktionsarbeiten vollständig unterbrochen werden. Dies führt im Falle einer Megayacht, welche ein sehr komplexen Bauprozess darstellt, zu längeren Fertigungszeiten. Für die messtechnischen Arbeiten und die folgende Datenprozessierung ist daraus die Anforderung abzuleiten, dass diese entsprechend zu beschleunigen sind. Auf die konkrete Umsetzung, mit welcher eine 3D-Objekterfassung mit hoher Genauigkeit und gleichzeitig Effizienz erreicht werden soll, wird im Folgenden detaillierter eingegangen.

1.1 Motivation

Im Fokus dieser Arbeit steht die Optimierung der gesamten Prozesskette bei der 3D-Objekterfassung. Diese besteht im wesentlichen aus den folgenden Schritten:

- Planung und Vorbereitung,
- 3D-Objekterfassung,
- Datenprozessierung und
- Analyse sowie Interpretation der Ergebnisse.

Aufgrund seiner einfachen Durchführung in Verbindung mit einer hohen Effizienz, hat sich das TLS und im speziellen das s-TLS für die 3D-Objekterfassung von industriellen Großstrukturen etabliert (Geist, 2017). Je nach örtlichen Gegebenheiten und vorgegebenen Genauigkeitsanforderungen, ergibt sich bei langgestreckten Objekten, wie z.B. Megayachten schnell eine erhöhte Anzahl von Standpunkten. Die Gründe dafür liegen an den oft nur begrenzten örtlichen Platzverhältnissen. Diese verhindern größere Entfernung zwischen Laserscanner und Objekt. Die objektnahen Aufstellungen führen schnell zu sehr flachen Auftreffwinkeln, wodurch die Genauigkeit bei der Objekterfassung beeinflusst wird. Um den entgegenzuwirken wird die Anzahl der Aufstellungen erhöht. Des Weiteren kann es auf Grund der örtlichen Gegebenheiten der Produktionsumgebung zu Verschattungen kommen, hierzu gehören z. B. Gerüste oder Planen. Dies führt dazu, dass für die Erfassung eines einzelnen Schiffsdecks die Anzahl der Laserscannerstandpunkte schnell auf 50 - 60 anwächst. Dies ist im oberen Teil der Abbildung 1.1 dargestellt. Hieraus resultieren zum Teil sehr redundante und daher große Datenmengen. Diese stellen eine besondere Herausforderung in der weiteren Prozessierung dar. Des Weiteren sind die einzelnen Standpunkte im Nachgang in einem einheitlichen Referenzkoordinatensystem zu einander auszurichten. Im Falle eines übergeordneten Referenzkoordinatensystem wird dieser Prozess als Georeferenzierung bezeichnet. In diesem Fall bildet die, trotz einer Vielzahl am Markt verfügbaren Referenzierungsmethoden, auf Zielzeichen basierte Methode noch immer den Standard. Dazu bedarf es einer ausreichenden Anzahl (mindestens drei) von Referenzpunkten, in den einzelnen Laserscans. Diese werden vorab durch einen externen Sensor, dies sind z. B. Tachymeter oder Lasertracker, mit Bezug zum übergeordneten Referenzkoordinatensystem eingemessen. Zwar ist durch die Kombination mehrerer Referenzierungsmethoden und durch eine verstärkte Automatisierung ein Trend zur zeitlichen Optimierung bei der Georeferenzierung zu beobachten. Der zeitliche Aufwand bleibt jedoch verhältnismäßig hoch. Auf diesen Aspekt, wird im Rahmen des Kapitels 2 noch genauer eingegangen.

Eine Alternative zum etablierten s-TLS ist das k-TLS. Im Falle einer 3D-Objekterfassung von langgestreckten Objekten ist dies eindeutig im Vorteil. Im unteren Teil der Abbildung 1.1 ist das Prinzip am Beispiel eines Schiffsdecks dargestellt. Wird der georeferenzierende Sensor, hier ein Lasertracker, im übergeordneten Referenzkoordinatensystem stationiert, so kann die mobile Plattform mit dem Laserscanner direkt georeferenziert werden. Auch hier ergeben sich Einschränkungen, wie z. B. durch die begrenzte Reichweite des Lasertrackers. Des Weiteren werden für dessen Stationierung Referenzpunkte benötigt. Da die Anzahl der Aufstellungen mit dem Lasertracker jedoch deutlich geringer als die des Laserscanners beim s-TLS ist, verringert sich der Aufwand. Des Weiteren ist es möglich die Stationierung Lasertrackers und die Bestimmung der Referenzpunkte in einem Arbeitsgang durchzuführen. Als zeitliches Einsparportential, wird für das hier aufgegriffene Beispiel eines



Abbildung 1.1: Darstellung einer 3D-Objektaufnahme eines Schiffsdecks mit s-TLS oben und k-TLS unten.

Schiffsdecks einer Megayacht, eine Verkürzung der Aufnahmedauer von bis zu 70% angenommen (Hartmann u. a., 2021). Zusätzlich werden auch einige genauigkeitssteigernde Aspekte, wie z. B. die Kontrolle und Optimierung des Auftreffwinkels beim Messvorgang, ermöglicht.

Trotz der Vorteile des k-TLS ist zu resümieren, dass mit den aktuell am Markt befindlichen Systemen die geforderten Genauigkeiten nicht erreicht werden können. Als Gründe sind zum einen der komplexere Vorgang beim k-TLS und zum anderen die damit verbundenen zusätzlichen Anforderungen zu nennen. Auf diese wird im folgenden Abschnitt 1.2 detaillierter eingegangen.

1.2 Zielsetzung und eigene Beiträge

Im Rahmen dieses Abschnittes ist die forschungsrelevante Zielstellung, welche im Rahmen dieser Dissertation bearbeitet wird, kurz dargestellt. Als zentrale Vorgabe ist eine 3D-Erfassung von langestreckten Objekten in einer industriellen Umgebung mit einer $\sigma_{3D} \leq 1$ mm zu definieren. Aufgrund seines Effizienzvorteils gegenüber dem s-TLS wird k-TLS verwendet. Die Entwicklung eines auf k-TLS basierten MSS, stellt eine besondere Aufgabe dar. Neben einer geeigneten Auswahl und Zusammenstellung der Sensoren werden eine möglichst effiziente Prozessierung und die qualitative Bewertung der erfassten Daten angestrebt. Als wesentliche Aspekte, welche sich bei der Verwendung eines k-TLS basierten MSS ergeben, sind neben der Georeferenzierung der mobilen Plattform, die Systemkalibrierung (Bestimmung der relativen Ausrichtung zwischen den Sensoren) und die Synchronisierung zu nennen. Besondere Herausforderungen gelten für die Bestimmung der Translationen und Rotationen. Speziell letztere sind als sehr kritisch zu sehen. Resultiert doch aus einer Abweichung von 6 mgon und einer Entfernung von 10 m eine Abweichung von 1 mm am Objekt. Eine nicht korrekten Synchronisierung, führt zu einer zeitlichen Latenz. Beträgt diese 1 ms und wird eine Plattformgeschwindigkeit von 1 m/s angenommen, so beträgt auch in diesem Fall die Abweichung 1 mm. Aus diesen Beispielen ist erkenntlich, dass es sich um eine komplexe Gesamtaufgabe handelt.

Für die 3D-Objekterfassung wird ein im Profilmodus arbeitender Laserscanner, welcher auf einer mobilen Plattform montiert ist, verwendet. Die Georeferenzierung der Plattform erfolgt durch einen Lasertracker (hier Leica AT960) in Verbindung einer T-Probe. Dieses Prinzip ermöglicht zwar eine direkte Georeferenzierung im übergeordneten Koordinatensystem, jedoch müssen für die spätere Transformation zwischen dem Koordinatensystem der T-Probe und des Laserscanners die 6 DoF bestimmt werden. Dieser Vorgang wird als Systemkalibrierung bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierfür ein auf RE-basiertes Verfahren verwendet. Die Bestimmung der optimalen Anordnung der RE erfolgt mit einer MCS. Um die Suche nach der optimalen Anordnung zu automatisieren, wird ein GA verwendet. Mit Hilfe der hieraus gewonnen Erkenntnisse, wird eine dauerhafte Kalibrierumgebung realisiert. Diese ermöglicht eine sehr effiziente und genaue Bestimmung der 6 DoF. Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt die punktgenaue Georeferenzierung der erfassten Laserscannerpunkte dar. Durch die Kabel-basierte Synchronisierung wird sichergestellt, dass pro Laserscannerprofil eine Georeferenzierungsmessung durch den Lasertracker erfolgt. Diese ist streng genommen nur für den ersten Punkt des Profils gültig. Da ein Laserscannerprofil jedoch, je nach Wahl der Messparameter, aus mehreren tausend Punkten besteht, ist die Bewegung zwischen den einzelnen Epochen (Profilen) zu beachten. Die im Rahmen der Arbeit erfolgten Untersuchungen zeigen, dass dieser Schritt im Falle von schnellen und dynamischen Bewegungen von entschiedener Relevanz ist. Für die punktgenaue Georeferenzierung wurde ein Filtermodell basierend auf einem Iterated Extended Kalman Filter (iEKF) implementiert. Abschließend wird eine Beurteilung der Datenqualität angestrebt. Voraussetzung dafür ist die Ermittelung der Gesamtunsicherheit eines mit dem k-TLS-basierten MSS erfassten Punktes. Dies erfolgt im Rahmen einer Vorwärtsmodellierung. Aufgrund des vorliegenden nicht linearen Zusammenhanges und der Komplexität wird für die Ermittelung eine MCS verwendet. Vorab sind die Messunsicherheiten der verwendeten Sensoren bzw. der Prozessierungsschritte genau zu spezifizieren. Die Umsetzung erfolgt nach den im Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) vorgegebenen Vorgaben. Mit Hilfe eines Vergleichs mit hochgenauen Referenzdaten, werden die erfassten Daten validiert (Rückwärtsmodellierung).

1.3 Gliederung der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit im Kapitel zwei wird das Thema 3D-Objekterfassung dargestellt. Als spezieller Anwendungsfall wird die Erfassung von industriellen Großstrukturen mit einer Ausdehnung von > 100 m aufgegriffen. Hierfür werden zunächst die Bedingungen und Anforderungen in der industriellen Fertigung beschrieben. Nach einem Überblick zum Thema Qualitätsmaßen und -parametern, erfolgt eine kurze Darstellung zu dem Methoden für die 3D-Objekterfassung. Im Fokus der Arbeit liegt das TLS. Die gängigsten Formen sind das s-TLS und das k-TLS, welche beide erläutert werden. Aufgrund seiner Effizienz ist das k-TLS besonders für die Erfassung von größeren Objekten geeignet. Die Erreichung der benannten hohen Genauigkeiten, stellt die besondere Herausforderung dar. Die hierfür nötigen Schritte werden entsprechend erläutert.

Im dritten Kapitel werden die mathematischen Grundlagen dieser Arbeit beschrieben. Hierzu gehören die Koordinatentransformation und die Methoden der Unsicherheitsmodellierung. Für die Ausgleichung der Daten wird das Gauß-Helmert-Modell (GHM) verwendet und daher hier beschrieben. Des Weiteren wird die räumliche Bestimmung der Form und Lage von Objekten thematisiert. Zur Anwendung kommt diese später bei der Bestimmung der RG. Abschließend werden die Grundlagen der Filterung dargestellt. Da im Rahmen der Arbeit das Kalman-Filter (KF) verwendet wird, wird dies hier beschrieben.

Das vierte Kapitel widmet sich der Systemkalibrierung. Zu Beginn werden die Strategien und Ansätze zu diesem Thema dargestellt. Grundlage dieser Arbeit bildet ein auf RG basierter Ansatz, welcher hier vorgestellt wird. Der besonderer Fokus liegt auf der Anordnung der RG. Neben den theoretischen Aspekten wird die Optimierung bei der Anordnung und Ausrichtung der RG themaDie Georeferenzierung der mobilen Plattform wird im fünften Kapitel thematisiert. Nach Vorstellung der Strategien und Ansätze wird der messtechnische Ablauf beschrieben. Wesentlichstes Ziel ist eine punktgenaue Georeferenzierung, bei welcher die Bewegung innerhalb eines Laserscannerprofils beachtet wird. Hierfür wird ein iEKF verwendet. Mit dem verwendeten k-TLS-basierten MSS werden Testmesssungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen werden mit hochgenauen Referenzdaten verglichen. Basierend hierauf werden die Ergebnisse bewertet.

Das Thema des sechsten Kapitels ist die Validierung und die Qualitätssicherung der k-TLS Daten. Zunächst werden die möglichen Strategien und Ansätze zusammengefasst. Besonderen Fokus stellt die Messung des Lasertrackers zur T-Probe dar. Hierfür erfolgen Genauigkeitsuntersuchungen, welche erläutert werden. Im Anschluss werden die Unsicherheiten der Einzelschritte dargestellt. Hierauf aufbauend wird die Gesamtunsicherheit eines k-TLS-Punktes modelliert. Dies erfolgt mit Hilfe einer MCS. Durch eine Rückwärtsmodellierung, welche auf eine Vergleich mit hochgenauen Referenzdaten aufbaut, werden die Ergebnisse bewertet.

Im Kapitel sieben werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Des Weiteren wird ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf sowie offene Punkte für weiterführende Arbeiten gegeben.

2 3D-Objekterfassung in der industriellen Fertigung von Großstrukturen

Die Fertigung von industriellen Großstrukturen stellt einen komplexen Gesamtprozess dar. Dieser besteht aus vielen Einzelschritten, welche oft miteinander verzahnt sind. Daraus resultieren zum Teil sehr strenge zeitliche Vorgaben. Hieraus lässt sich die Forderung abgeleitet, dass zum einen die Einzelschritte zu beschleunigen sind. Des Weiteren ist auf einen sinnvollen zeitlichen Ablauf, welcher größere Ausfallzeiten vermeidet, zu achten. Ein weiterer Aspekt ist die Qualität. Hier gibt es häufig sehr strenge Vorgaben bezüglich der zu erreichenden Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit für die Fertigung. An dieser Stelle ist anzumerken, dass beides sowohl die Qualität, als auch die Effizienz von einander abhängen kann. Bei qualitativen Mängeln eines Fertigungsschrittes kann es zu Nacharbeiten bzw. zu einer kompletten Neubearbeitung kommen. Dadurch verzögert sich schließlich der Gesamtprozess, was zu steigenden Kosten führt. Beide Aspekte, eine effiziente und eine qualitative Fertigung sind daher anzustreben. Einen wesentlichen Beitrag in der Qualitätssicherung bei der Sicherung der Qualität leistet die 3D-Objekterfassung. Da dies traditionell eine der Kernaufgaben in der Ingenieurgeodäsie und Industrievermessung ist, leistet die Geodäsie hier einen wertvollen Beitrag.

Zu Beginn des Kapitels erfolgt zunächst eine kurze Darstellung der spezifischen Bedingungen und Anforderungen, welche bei der Produktion von industriellen Großstrukturen bestehen. Des Weiteren werden die daraus resultierenden Anforderungen, welche an die Messtechnik und die Auswertealgorithmen gestellt werden, erläutert. Anschließend werden die Grundlagen zur Betrachtung von Genauigkeiten und zu Messunsicherheiten erläutert. Des Weiteren wird zunächst ein Überblick über die Methoden, welche für eine 3D-Objekterfassung im industriellen Bereich in Frage kommen, dargestellt. Anhand der beiden Hauptkriterien Effizienz und Qualität, wird deren Anwendbarkeit bei der 3D-Erfassung von industriellen Großstrukturen bewertet. Hieraus resultiert, dass sich das TLS besonders eignet. Nach Erläuterung des Messprinzips und der Sensorik werden die beiden Aufnahmeverfahren s-TLS und k-TLS erläutert. Auf Grund seiner hohen Effizienz wird hier im Speziellen das k-TLS aufgegriffen. Da die aktuell am Markt befindlichen k-TLS-basierten MSS nicht die erforderlichen Anforderung erfüllen, ist es Ziel dieser Arbeit ein neuartiges k-TLS-basiertes MSS zu entwickeln. Das grundlegende Prinzip, die verwendeten Sensoren und die sich daraus ergebenen Anforderungen und Aufgaben werden abschließend vorgestellt.

2.1 Bedingungen und Anforderungen in der industriellen Fertigung

Bei der industriellen Fertigung von Großstrukturen, mit einer Ausdehnung von > 100 m Länge handelt es sich um einen sehr komplexen Prozess. Da die Fertigung aus sehr vielen Einzelprozessen bestehen kann, sind diese möglichst optimal aufeinander abzustimmen. Eine wesentliche Bedeutung kommt dabei der Qualitätssicherung zugute, stellt diese doch die Basis für die weiterführenden Arbeiten dar. Aus geodätischer Sicht ist dabei die 3D-Objekterfassung und die darauf beruhende Modellierung der Oberflächen zu nennen.

Neben der Luft- und Raumfahrt, der Fertigung von industriellen Anlagen, wie z. B. Produktionsstraßen, ist der Schiffbau als konkretes Beispiel zu nennen. Ein spezieller Fall ist die Fertigung der Außenflächen von Megayachten, welche sehr hohen ästhetischen Ansprüchen genügen müssen. Aus diesem Grund werden sichtbare Schiffsstrukturen im Außenbereich in einem sehr aufwändigen manuellen Prozess mit Spachtel geglättet und anschließend hochglänzend lackiert. Dieser Beschichtungsprozess kann bis zu zwölf Monate je Yacht dauern und zu Kosten in Millionenhöhe führen. Eine Möglichkeit der Beschleunigung des Beschichtungsprozesses besteht in der Erfassung und Analyse der zu beschichtenden Schiffsgeometrie, so dass im Anschluss Kenntnis über die lokal aufzutragende Spachtelschichtdicke (Spachtellandkarte) besteht und die Prozesse darauf basierend optimiert gesteuert werden können. Dadurch kann der iterative Spachtelprozess durch eine gezielte Prozessplanung optimiert werden. Dies ermöglicht und erfordert gleichzeitig eine signifikante Produktivitätserhöhung der messtechnischen und analytischen Prozessschritte, damit die Spachtellandkarte rechtzeitig verfügbar ist (Hartmann u. a., 2021) und (Gierschner u. a., 2021). Der gesamte Prozess bestehend aus 3D-Objekterfassung, der Datenaufbereitung und -modellierung sowie der der Spachtelsimulation ist in der Abbildung 2.1 dargestellt.



Abbildung 2.1: Darstellung der Prozesskette bei der Beschichtung von Megayachten (Hartmann u. a., 2021)

Im Fokus dieser Arbeit liegen die beiden ersten Teilprozesse 3D-Objekterfassung und Datenaufbereitung. Da schon Abweichungen von wenigen Millimetern zu den Vorgaben der Konstruktion aus ästhetischer Sicht als Störstellen gelten, sind diese rechtzeitig zu detektieren und gegebenenfalls entsprechende Nacharbeiten zu tätigen. Für die Messtechnik ist daraus als Vorgabe abzuleiten, dass die 3D-Objekterfassung mit einer Genauigkeit von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm, spezifiziert als Helmertscher 3D-Punktfehler für einen Einzelpunkt, erfolgen muss. Im Sinne der Vollständigkeit, ist auf eine entsprechende Abdeckung bei der Erfassung der 3D-Objekte zu achten. Je nach Detailgrad ist die Punktdichte bei der Messung gegebenenfalls anzupassen. Daraus ist erkenntlich, dass besondere Anforderungen an die messtechnische Umsetzung resultieren. Des Weiteren ist ein Aussetzen eines Großteils der Produktionsarbeiten, hierzu zählen z. B. Schweiß- und Verformungsarbeiten, nicht zu vermeiden. Somit kommt es zu längeren Ausfallzeiten und der Gesamtfertigungsprozess wird verlangsamt. Um die 3D-Objektaufnahme entsprechend zu beschleunigen und damit das Zeitfenster möglichst gering zu halten, gelten die folgenden Herausforderungen:

- effiziente Vorbereitung (Planung und Messaufbau) sowie
- Optimierung der 3D-Objekterfassung, hier zu zählen:
 - zeitlicher Ablauf Messung (Minimierung der Wege und Aufstellungen) und
 - wenige redundante Erfassung,
- möglichst echtzeitnahe Aufbereitung der Daten für die Qualitätssicherung:
 - Überprüfung auf Vollständigkeits- bzw. Detailgrad (Punktauflösung),
 - Ableitung der Gesamtgenauigkeit der 3D-Objekterfassung (Unsicherheitsmodellierung) und
 - Bestimmung der Abweichung zwischen Ist- zu Sollzustand der Fertigung.

Neben den messtechnischen Herausforderungen bestehen in der industriellen Fertigung oft sehr anspruchsvolle örtlichen Bedingungen. Diese ergeben sich aus der Besonderheit der Produktionsumgebung. Beispielhaft sind hier zu nennen:

9

- detailreiche und stark verwinkelte Objektbereiche,
- Verdeckung von Objektbereichen durch temporäre Hindernisse (z. B. Gerüste, Kabel und Planen),
- beengte örtliche Platzverhältnisse,
- unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten (Problematisch bei TLS sind spiegelnde oder schwarze Oberflächen),
- Erschütterungen durch externe Prozesse,
- schwierige Beleuchtungsverhältnisse,
- Verschmutzung der Oberflächen z. B. durch Staub und
- Änderungen der atmosphärischen Verhältnisse (betrifft eher Außenbereiche)

Anhand der aufgezählten Punkte ist erkenntlich, dass die Erfassung von industriell gefertigten Großstrukturen aus geodätischer Sicht eine besondere Herausforderungen darstellt. Hinzu kommt, dass die Ausdehnung der Objekte immer weiter wächst, so ist z. B. in den letzten Jahren die Größe von Luxusyachten auf fast 200 m Länge angewachsen. Aus Effizienzgründen hat sich dafür s-TLS als Standardaufnahmeverfahren etabliert. Auf Grund der benannten schwierigen örtlichen Bedingungen und weiteren messtechnischen Vorgaben, wie z. B. die Vermeidung von Abschattungen und eines zu flachen Auftreffwinkels des Laserstrahls am Objekt, wird dabei jedoch schnell eine hohe Anzahl an Standpunkten erreicht, siehe Abschnitt 1.1. Aus der hier dargestellten Komplexität wird erkenntlich, dass auch die vorerst als Einzelprozess dargestellte 3D-Objektaufnahme als Prozess-kette zu betrachten ist. Im Wesentlichen ergeben sich die folgenden Arbeitsschritte:

- Aufstellung einer geeigneten Messstrategie,
- Durchführung der 3D-Objekterfassung,
- Datenprozessierung und
- Qualitätssicherung (Vollständigkeit, Detailgrad und Genauigkeit).

Unter der Vorgabe einer möglichst effizienten Bearbeitung und der Einhaltung der vorgegebenen Qualitätsanforderungen ergeben sich die folgenden Ziele und Vorgaben:

- Optimierung von Planung und Messstrategie,
- Verwendung geeigneter Sensoren bzw. eines Messsystems,
- Beschleunigung des Datenaustausches zwischen den Sensoren,
- Implementierung einer effizienten Prozessierung (schnelle Datenauswertung) und
- Modellierung der Gesamtunsicherheit der 3D-Objekterfassung.

Die Verbesserung der gesamten Prozesskette ist ein iterativer Prozess. Hierbei gilt es die örtlichen Begebenheiten zu berücksichtigen und die Anforderungen anderer Fachdiziplinen, wie z. B. Design, Konstruktion und Maschinenbau, mit zu beachten.

2.2 Grundlagen zu Qualitätsmaßen und -parametern

Für die spätere Betrachtung spielt die Betrachtung der Begriffe Genauigkeit, Messabweichung bzw. -unsicherheit und deren Bedeutung eine wichtige Rolle. Daher werden diese hier zunächst erläutert bzw. die Zusammenhänge dargestellt. Dies bildet eine wichtige Grundlage, für die Betrachtungen der Sensorunsicherheiten im Rahmen dieses Kapitels bzw. auch für die Darstellungen in den Kapiteln 4 - 6. Aus Gründen der Übersichtlichkeit, erfolgt die Beschreibung der mathematischen Zusammenhänge im Abschnitt 3.2.1.

Klassisch erfolgt eine Einteilung von Abweichungen in zufällige und systematische Anteile. Der zufällige Anteil wird auch als Präzision bezeichnet und stellt ein Maß für die Streuung eines Messwertes mit Bezug zu einem Mittel- \bar{x} bzw. Erwartungswert μ_x dar. Diese können um Anteile systematischer Art verfälscht sein. Dies wird als Richtigkeit δ bezeichnet und stellt den Unterschied zum wahren Werte \tilde{X} dar. Da dieser in der Praxis schwer zu bestimmen sein wird, ist es ausreichend, wenn er durch ein Messverfahren bzw. mit Hilfe eines Sensors, welcher eine um den Faktor 10 höhere Genauigkeit besitzt, bestimmt wird (Niemeier, 2008). In diesem Falle wird auch die Bezeichnung Sollwert verwendet. In der Abbildung 2.2 werden die Zusammenhänge für den 2D-Fall zwischen den einzelnen Größen gezeigt. Die einzelnen Messwerten sind dort durch die schwarzen Punkten dargestellt.



Abbildung 2.2: Darstellung (schwarze Punkte) der einzelne Messwerte x_i , sowie die Größen Erwartungswert μ_x und wahrer Wert \tilde{X} . Des Weiteren sind die Größen Präzision σ und Richtigkeit δ dargestellt (Witte u. a., 2020).

Die Richtigkeit, wird im Wesentlichen durch die systematische Abweichungen Δ beeinflusst. Diese ergeben sich als Unterschied zwischen \tilde{X} und μ_X , vergleiche Gleichung 3.9. Systematische Abweichungen werden weitestgehend möglich und nach Erforderlichkeit durch Reduktionen, Korrektionen oder durch einen geeigneten Messaufbau eliminiert. Ein Beispiel hierfür ist das Anbringen der Nullpunktskorrektion bei der Streckenmessung. Die zufälligen Abweichungen ε_i beeinflussen ebenfalls die einzelnen Messwerte. Sie berechnen sich aus der Differenz zu μ_x , vergleiche 3.9. Die zufälligen Anteile besitzen verschiedene Vorzeichen sowie Größenordnungen. Ihr mittleres Verhalten wird mittels einer Zufallsvariablen x_i beschrieben. Wichtige Indikatoren für die Bewertung einer Zufallsvariable (Messwert) sind die Maße Präzision und Genauigkeit. Diese beschreiben wie stark x_i streut. Ein Unterschied bestehen dabei im Bezugswert, dies kann zum einen \bar{x} bzw. μ_x oder zum anderen \tilde{X} sein. In beiden Fällen wird der Qualitätsparameter als empirische Varianz s_0^2 bezeichnet, vergleiche Gleichung 3.10. Hierbei wird eine endliche Anzahl *i* von Messwerten angenommen. Geht diese gegen unendlich so wird dies als theoretische Varianz σ_0^2 bezeichnet. Die Berechnung ist in der Gleichung 3.11 beschrieben. Durch Ziehen der Quadratwurzel der unterschiedlichen Varianzen wird die empirische Standardabweichung s_0 und die theoretische Standardabweichung σ_0 erhalten,

vergleiche Gleichungen 3.12 und 3.13.

Der Begriff Genauigkeit beschreibt die Übereinstimmung zwischen dem Ergebnis einer Messung und dem wahren Wert einer Messgröße und gilt als qualitatives Konzept. Erfolgt die Berechnung von s_0^2 und σ_0^2 bzw. von s_0 und σ_0 mit Hilfe des Mittelwerts \bar{x} , liegt kein Genauigkeitsmaß vor. In diesem Fall besteht kein Bezug zu \tilde{X} der Messgröße und jegliche systematische Abweichungen werden nicht berücksichtigt. Im Allgemeinen bezieht sich der Begriff Genauigkeit auf die Kombination aus Richtigkeit und Präzision. Durch Steigerung dieser bei modernen geodätischen Sensoren ist der Umgang mit den systematischen Messabweichungen in den letzten Jahrzehnten mehr in den Fokus gerückt. Da die Sensorik mittlerweile so präzise ist, gehen auch kleinere systematische Abweichungen nicht mehr zwangsläufig im Messrauschen unter. Würden alle systematischen Effekte einer Messung durch Korrektion oder Reduktion vollständig berücksichtigt, fallen μ_x und \hat{X} einer Messgröße zusammen. Dies wird in der Praxis weder möglich noch wirtschaftlich begründbar sein. Daher sind die systematischen Messabweichungen zum einen in bekannte bzw. beherrschbare und zum anderen in unbekannte bzw. nicht erfassbare zu unterscheiden. Um auch letztere berücksichtigt zu können, ist eine Betrachtung der (Mess-)Unsicherheiten, im Folgenden vereinfacht als Unsicherheit bezeichnet, sinnvoll. Im Gegensatz zu dem qualitativ verwendeten Begriff der Genauigkeit ist diese als ein quantitativer Parameter zu interpretieren. Allgemein wird hierdurch die Annäherung des Messergebnisses an X einer Messgröße beschrieben. Oft erhält eine (Mess-)unsicherheit zwei Komponenten. Eine, die aufgrund von statistischen Kenntnissen ermittelt wird und eine, welche aus anderen Informationen und Annahmen abgeschätzt bzw. gewonnen wird (DIN 1319-3:1996-05, 1996). Eine ähnliche Herangehensweise wird auch nach dem GUM vorgegeben. Dieser stellt einen international anerkannten Leitfaden dar und liefert einen Standard für den Umgang mit Unsicherheiten in der Messtechnik.

Aus dem GUM ist zu entnehmen, dass die Unsicherheit ein mit dem Ergebnis einer Messung verbundener Parameter ist. Durch ihn wird die Streuung der Werte charakterisiert, welche vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden. Die Unsicherheit besteht im Allgemeinen aus vielen Komponenten. Nach dem GUM wird dabei zum besseren Verständlichkeit in die Typen A und B unterschieden. Typ A bedeutet, dass die Unsicherheit aufgrund von statistischen Erkenntnissen ermittelt werden. Typ B basiert hingegen auf Erfahrungen, Informationen und Annahmen. Es ist jedoch anzumerken, dass diese Kategorien nicht mit der traditionellen Einteilung in zufällig und systematisch gleichzusetzen sind. Beispielsweise ist es möglich, dass die Unsicherheit einer Korrektur für eine bekannte systematischen Abweichung in einigen Fällen durch eine Typ A Bewertung, in anderen Fällen durch eine Typ B Bewertung ermittelt wird. Analog verhält es sich bei der Unsicherheit, welche eine zufälligen Abweichung charakterisiert. Die Einteilung soll nicht bedeuten, dass sich die Komponenten, die sich aus den beiden Bewertungsarten ergeben, in ihrer Art unterscheiden. Beide Arten der Bewertung basieren auf Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF). Ihre Unsicherheitskomponenten werden durch Varianzen oder Standardunsicherheiten $u(x_i)$ quantifiziert, welcher der jeweiligen Eingangsgröße x_i zugeordnet sind. Im Falle einer Auswertung nach Typ A basiert diese auf Häufigkeitsverteilungen. Finden wiederholte Beobachtungen statt und wird eine Normalverteilung angenommen, so ergibt sich $u(x_i)$ bzw. deren Varianz $u^2(x_i)$ aus der empirisch berechneten Varianz bzw. Standardabweichung nach den Vorgaben des Abschnittes 3.2.1. Im Fall B werden die Eingangsgrößen nicht durch wiederholte Messung gewonnen und daher a priori Verteilungen verwendet, vergleiche hierzu auch Abschnitt 3.2.2. Je nach Bestimmung, ergibt sich eine unterschiedliche Art der Verteilung, beispielsweise sind hier die Normal-, Rechteck- oder Trapezverteilung zu nennen. Die $u(x_i)$ wird bestimmt aufgrund von

- vorab gewonnenen Messungen,
- Erfahrungen, welche mit oder aus allgemeinen Kenntnisse über das Verhalten und die Eigenschaften der relevanten Materialien und Instrumente gewonnen wurden,
- Herstellerspezifikationen,

- Angaben welche aus Kalibrierungen und Zertifikaten stammen und
- Unsicherheiten, welche aufgrund von Referenzdaten basieren aus Handbüchern gewonnen werden.

Werden für die Bestimmung einer Ausgangsgröße y mehrere Eingangsgrößen x_i verwendet, siehe hierzu Gleichung 3.22, so sind die einzelnen Standardunsicherheiten $u(x_i)$ der Eingangsgrößen zusammenzufassen. Hieraus ergibt sich die kombinierte Varianz $u_c^2(y)$ bzw. die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$. Für die Berechnung sei auf die Gleichungen 3.26, 3.27 und 3.28 verwiesen. Als eine abschließende Größe wird nach GUM die erweiterte Messunsicherheit U angegeben. Hierbei handelt es sich im eine Größe, die ein Intervall um das Ergebnis einer Messung definiert, von dem erwartet werden kann, dass es einen großen Teil der Verteilung der Werte umfasst, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden können (JCGM, 2008b). Für die Berechnungen und weitere Details wird auf 3.29 verwiesen.

2.3 Überblick Methoden der 3D-Objekterfassung

Bei der 3D-Objekterfassung haben sich in den letzten Jahrzehnten diverse Aufnahmemethoden etabliert. Eine Vielseitigkeit an messtechnischen Aufgaben hat zur Folge, dass eine große Anzahl an unterschiedlichen Methoden entwickelt wurden. Im Fokus dieser Arbeit stehen nur Messsysteme, welche für den Indoor-Bereich und für die industriellen Fertigung (vgl. Abschnitt 2.1) verwendet werden können. Bei der Erfassung wird in Einzelpunkt- und flächenhafte Verfahren unterschieden. Wobei hier zu erwähnen ist, dass es sich auch bei den flächenhaften Methoden um Einzelpunktmessungen handelt. Bei der klassischen Einzelpunktmessung besteht der Vorteil, dass diese mit einer sehr hohen zeitlichen Erfassungsrate (Wiederholbarkeit) durchgeführt werden kann. Beispiele hierfür sind Koordinatenmessgerät (KMG), Industrietheodolit, Lasertracker und optische Abtastsysteme (Probing). Bei der flächenhaften Aufnahme steht eine möglichst effiziente Objekterfassung im Fokus. Wesentliche Größen sind hierbei die Erfassungsgeschwindigkeit, hier gemessen in Fläche pro Zeit, sowie die Punktdichte. Die Wahl des Messverfahrens richtet sich nach der Art des Auftrages. Das Spektrum kann von einer effizienten Erfassung großer Flächen, bis hin zu einer möglichst detaillierten Aufnahme von kleineren Objektbereichen reichen. Beides ist bei der Fertigung von industriellen Großstrukturen relevant. Den Fokus dieser Arbeit bildet jedoch eine möglichst effiziente und gleichwertig qualitativ hochwertige Erfassung von großen Objektbereichen. Daher sind hier die flächenhaften Verfahren zu bevorzugen. Diese unterteilen sich in Bild- und Laser-basierte Verfahren. Die Abbildung 2.3 zeigt einen Überblick über einige Verfahren bei der 3D-Objekterfassung.

Bild- und Laser-basierte Verfahren haben jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile bzw. können sie sich sogar ergänzen. Die Bild-basierten Methoden haben bei schlechten Lichtverhältnissen bzw. bei wenig strukturierten Oberflächen Nachteile. Des Weiteren benötigen sie viel Rechenleistung für die Verarbeitung der Daten bzw. viel Speicherplatz für die Bilder. Bei den Laser-basierten Methoden, kann es bei spiegelnden, rauen sowie bei schwarzen Oberflächen zu Problemen kommen. Des Weiteren können bestimmte atmosphärische Bedingungen, wie z. B. eine hohe Luftfeuchtigkeit zu Problemen kommen. Speziell Verfahren, welche die Interferometermessung (IFM) sind davon betroffen. Einige der Verfahren, welche in der industriellen Fertigung schon zum Einsatz kommen, sollen im Folgenden kurz erläutert werden. Des Weiteren wird die Anwendbarkeit für eine 3D-Objekterfassung bezüglich der in Abschnitt 2.1 genannten Kriterien diskutiert.

Bei den Bild-basierten Verfahren wird nach Luhmann u.a. (2020, S. 154) in eine Offline- und Online-Variante unterschieden. Offline bedeutet, dass durch Einzelkameras Bilder des 3D-Objektes aus verschiedenen Orientierungen erfasst werden. Die Orientierung der Einzelbilder erfolgt meist im Nachgang über codierte Retro-Reflective Targets. Die 3D-Koordinaten werden im Rahmen einer Bündelblock-Triangulation (Ausgleichung) erhalten. Die wesentlichen Vorteile sind die Flexibilität, geringe Kosten und die einfache Anwendung. Beispiele dafür sind V-STARS von Geodetic Systems Inc. (GSI, 2021) und MaxShot 3D von Creaform (Creaform, 2021). Online Systeme bieten



Abbildung 2.3: Überblick der Methoden der 3D-Objekterfassung in der industriellen Fertigung.

stattdessen die Möglichkeit einer direkten zeitnahen 3D-Objekterfassung. Sie werden auch als optische Koordinatenmessmaschienen bezeichnet und bestehen im Wesentlichen aus mindestens zwei synchronisierten Kameras, bei welchen die Parameter der inneren Orientierung (Sensorkalibrierung) und der äußeren Orientierung in einem gemeinsamen Koordinatensystem zu bestimmen sind. Beispiele hierfür sind PONTOS Live von GOM (GOM, 2021) und CamBar sowie SingleCam von AXIOS 3D (AXIOS 3D, 2021). Bei beiden Systemen ist eine sehr hohe relative Messgenauigkeit mit 1:10000 bis 1:20000 für Online (Luhmann u. a., 2020, S. 587) und 1:50000 bis zu 1:250000 für Offline (Luhmann u.a., 2020, S. 582) möglich. Dies führt bei einer Objektentfernung von < 15m zu Genauigkeiten von < 1 mm. Als ein weiteres Verfahren, welches auch den Offline-Varianten zuzuordnen ist, ist Structure from Motion (SfM) zu nennen. Hierbei wird das 3D-Objekt durch eine Reihe von Bildern erfasst, welche aus verschiedenen Positionen aufgenommen wurden. Der Vorteil gegenüber herkömmlichen digitalen photogrammetrischen Methoden ist, dass gleichzeitig die 3D-Kameraposition und die Geometrie bestimmt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass sich die Bilder überlappen. Dies stellt zwar eine sehr effiziente und preisgünstige Umsetzung dar, jedoch liegen die erreichbaren Genauigkeiten im Bereich einiger Millimeter bis weniger Zentimeter, vergleiche Westoby u. a. (2012) und Bianco u. a. (2018).

Während die reine photogrammetrische Erfassung als passive Methode bezeichnet wird, wird das Streifenprojektions-/Lichtschnittverfahren als aktive Methode klassifiziert. Das grundlegende Prinzip ist, dass ein Projektor parallele oder auch gitterförmig angeordnete Lichtstreifen auf das Objekt wirft. Diese werden durch eine oder mehrere Kameras beobachtet. Aus der Phasenverschiebung des projizierten Lichtes wird die Abstandsänderung zwischen Objekt und der Kamera abgeleitet. Auch hier sind Genauigkeiten von < 1 mm erreichbar. Beispiele für diese Methode sind z. B. RS-SQUARED von Hexagon (Hexagon, 2022b) oder die ATOS-Reihe von GOM (GOM, 2022). Zusammenfassend ist jedoch festzustellen, dass der Arbeitsbereich auf 1-2 m begrenzt ist (Luhmann u. a., 2020). Durch die Adaption der entsprechenden Sensoren an einem Messarm wird der Arbeitsbereich zwar erhöht, jedoch ist die Gesamtaufnahme eines Objekts, welches eine Dimension von > 10 m hat, ohne Umbau nicht möglich. Eine weitere Möglichkeit sind Time of Flight (ToF)-Kameras. Das grundlegende Prinzip ist, dass ausgesendetes Licht vom Objekt reflektiert wird und von einer Kamera erfasst wird. Der Arbeitsbereich ist jedoch auf den Nahbereich < 5 m begrenzt.

Die typische Genauigkeit ist mit 1:100 angegeben, was bei einer Objektentfernung 5 mm entspricht (Luhmann u. a., 2020, S. 254).

Als eines der Laser-basierten Verfahren sind Linienlaserscanner, welche nach dem Triangulationsprinzip arbeiten, zu klassifizieren. Ein Beispiel ist der LAS-XL von Hexagon. Als Messunsicherheit für die Erfassung einer Ebene, wird $U_P = \pm 450 \,\mu\text{m}$ (spezifiziert mit 2σ) angegeben (Hexagon, 2022c). Vorteilhaft ist, dass der LAS-XL direkt durch eine 6 DoF Messung, welche der Lasertracker durchführt, georeferenziert wird. Die maximale Messentfernung beträgt beim Modell Leica AT960-XR 30 m. Hieraus resultiert einen Arbeitsbereich für die Georeferenzierung von bis zu 60 m, jedoch wird die Aufnahme bei Objekten mit einer Ausdehung von > 100 m mit dem LAS-XL entsprechend lang dauern. Der Grund hierfür ist das der maximale Scanbereich des LAS-XL bei einer Objektentfernung von 0,7 m nur 0,468 m beträgt. Auch hier besteht die Möglichkeit der Adaption an einem Messarm, was den Automatisierungsgrad nochmals steigert, jedoch wird hierdurch wiederum der Arbeitsbereich auf wenige Meter beschränkt.

Bezüglich der bisher vorgestellten Verfahren ist festzustellen, das zum Teil zwar die geforderte Messgenauigkeit erreicht wird, jedoch ist oft nur ein geringer Messabstand von wenigen Metern (< 10 m) möglich. Im Falle eines größeren Messvolumens > 100 m und unter Beachtung der im Abschnitt 2.1 benannten Herausforderungen, welche aus der Messumgebung resultieren, kann sich ein erheblicher zeitlicher Aufwand ergeben. Typische Anwendungsbereiche sind daher die Erfassung einzelner Bauteilen bzw. von kleineren Objekten, wie z. B. Fahrzeuge. Eine Übersicht über das Verhältnis zwischen erreichbarer Genauigkeit und Objektgröße unterschiedlicher industrieller Messverfahren, ist in der Abbildung 2.4 gegeben.



Abbildung 2.4: Darstellung des Verhältnisses zwischen Genauigkeit und Objektgröße bei unterschiedlichen industriellen Messverfahren, mit CMM (Bösemann, 2017).

Die verbleibenden Methoden sind dem TLS zuzuordnen. Nach einer kurzen Darstellung der Grundlagen im Abschnitt 2.4, wird auf die beiden Verfahren s-TLS im Abschnitt 2.5 und k-TLS im Abschnitt 2.6 eingegangen. Hierbei werden die grundlegenden Prinzipien, die verwendete Sensorik, die Messstartegien und schließlich die Anwendbarkeit bei der 3D-Objekterfassung von industriellen Großstrukturen näher erläutert.

2.4 Terrestrisches Laserscanning

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zur Messverfahren TLS dargestellt. Zunächst werden des Messprinzips und eine Auswahl in Frage kommender Laserscanner dargestellt. Anschließend die Themen Sensorkalibrierung und Messunsicherheiten von Laserscannern erläutert.

2.4.1 Messprinzip und Sensorik

Beim TLS kommt das Prinzip der diskreten Einzelpunktbestimmung zur Anwendung. In der Gesamtheit wird dies jedoch als 3D-Punktwolke bezeichnet. Durch eine im Laserscanner verbaute Diode (Sendeeinheit) wird ein Laserstrahl emittiert. Dieser wird anschließend an einem um die Kippachse rotierenden Spiegel abgelenkt, am Objekt reflektiert und abschließend in der Empfangseinheit wieder detektiert. Daraus leitet sich die Distanz (D) zwischen Laserscanner und Objektpunkt ab. Als Messprinzip kommen hierfür das Impulslaufzeit- oder das Phasenvergleichsverfahren zum Einsatz. Die Rotation des Spiegels wird als vertikale Drehung (v) bezeichnet und am Encoder des Vertikalkreises inkrementell erfasst. Dieses Messprinzip, wird auch als Profilmodus (2D-Modus) bezeichnet. Erfolgt zusätzlich eine horizontale Drehung (hz) um die Stehachse, so wird dies als 3D-Modus bezeichnet, siehe Abbildung 2.5.



Abbildung 2.5: Das Messprinzip des TLS.

Auch diese wird inkrementell durch den Encoder am Horizontalkreis erfasst. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Größen hz und v streng genommen nur für eine horizontierte Aufstellung des Sensors gelten. Aus Gründen der Vereinfachung und zur bessern Übersichtlichkeit werden sie jedoch allgemeingültig verwendet. Eine weitere Messgröße stellt die Intensität des empfangenen Signals (Signalstärke) dar. Im Verlauf dieser Arbeit, wird diese als unskalierter Wert verwendet und als Rohintensität (*Inc*) bezeichnet. Die polaren Messelemente hz, v und D können mit den Gleichungen

$$X = D \cdot \cos(hz) \cdot \sin(v),$$

$$Y = D \cdot \sin(hz) \cdot \sin(v) \quad \text{und}$$

$$Z = D \cdot \cos(v)$$
(2.1)

in kartesische Koordinaten X, Y, Z umgerechnet werden. Auf eine detailliertere Beschreibung der Messgrößen bzw. deren Erfassung wird in diesem Rahmen verzichtet. Dies kann der Grundlagenliteratur Joeckel und Stober (2008) entnommen werden. Hier finden sich auch Ausführungen zu Korrektionen und Reduktionen, wie z. B. der 1. Geschwindigkeitskorrektion bei der Distanzmessung. Da deren Berücksichtigung bei den meisten Herstellern intern im Laserscanner erfolgt, wird im weiteren Verlauf davon ausgegangen, dass diese entsprechend angebracht wurden. Des Weiteren werden einige der systematischen Abweichungen von Laserscannern im Rahmen der Sensorkalibrierung, vergleiche Abschnitt 2.4.2, erläutert. Auf die verbleibenden Messunsicherheiten wird im Abschnitt 2.4.3 eingegangen.

Im Laufe der letzten zwanzig Jahren gab es viele technische Weiterentwicklungen. Auf dem Markt sind aktuell unterschiedlichste Modelle mit entsprechenden Spezifikationen vorhanden. Aufgrund der besonderen Genauigkeitsanforderungen an die 3D-Objekterfassung werden hier nur Modelle, welche dem High-End-Bereich zuzuordnen sind, vorgestellt. Als Distanzmessverfahren verwenden die Hersteller vorrangig das Phasenvergleichsverfahren. Hierzu gehören die Modelle IMAGER 5010 und 5016 sowie PROFILER 9012 und 9020 der Herstellers Z+F und der Surphaser 400. Beim Hersteller Leica werden erfolgt eine Kombination aus Phasenvergleichs- und Impulsmessverfahren. Dabei werden die jeweiligen Vorteile der Technologien genutzt. Diese Prozess wird von Leica als Waveform-Digitizing (WFD) bezeichnet, detailliertere Informationen sind in Maar und Zogg (2021) zu finden. Die Modelle, welche nach diesem Prinzip arbeiten sind die Leica P40 und der Leica RTC360. Alle wesentlichen Parameter der Modelle sind in der Tabelle 2.1 zusammengestellt. Die Klassifizierung erfolgt dabei in Laserscanner, welcher nur im 2D- oder 3D-Modus arbeiten, sowie in Modelle, welche im 2D- und 3D-Modus arbeiten. Einige relevante Spezifikationen sollen an dieser

Tabelle 2.1: Darstellung der Parameter einer Auswahl von aktuell am Markt verfügbaren Laserscannermodellen aus dem High-End-Bereich. Klassifiziert wird nach reinen 2D- oder 3D-Modus sowie in kombinierten 2D-/3D-Modus, Leica P40 (Leica, 2016) + RTC360 (Leica, 2018), Z+F IMAGER 5010 (Z+F, 2010) + 5016 (Z+F, 2018), Z+F PROFI-LER 9012 (Z+F, 2012) + 9020 (Z+F, 2022b) und Surphaser 400 (Basis Software, Inc., 2017).

Hersteller	Z+F PROFILER		Leica	Z+F IMAGER		Leica	Surphaser
Modell	9020	9012	P40	5016	5010	RTC360	400
Scan-Modus	2	D	2D/3D			3D	
Gewicht [kg]	6,5	$13,\!5$	12,25	7,5	11	5,35	5,8
Drehrate max. [rps]	267	200	100	55	50	100	116
FoV ¹ [°] vertikal	360	360	290	320	320	300	270
Pixel/Profil	1024	5120	5000	1250	1250	5000	4320
min/max	20480	20480	20000	80000	100000	20000	129600
Distanzmess- modus	Phase	Phase	Phase/ Impuls	Phase	Phase	Phase/ Impuls	Phase
Laser-Rate max. (Mio)	1,094	1,016	1	1,1	1,016	2	0,832
Reichweite min/max [m]	0,3 - 182	0,3 - 119	0,4 - 270	0,3 - 365	0,3 - 187	0,5 - 130	1 - 250

¹ Field of View (FoV)

Stelle kurz näher erläutert werden. Das geringste Gewicht (ca. 6 kg) haben die Modelle Leica RTC360 und Surphaser 400. Dies ist von Vorteil beim Transport oder bei der Integration in ein MSS. Die höchsten maximalen Drehraten, dies bezieht sich auf die vertikale Umdrehung, sind bei den Laserscannern, welche nur im 2D-Modus arbeiten, zu verzeichnen. Hierbei werden Werte bis maximal 267 Rounds per Second (rps) erreicht. Dieser Parameter ist vor allem beim k-TLS von Relevanz, ergibt sich doch der Abstand zwischen zwei benachbarten Scanprofilen aus dem Zusammenspiel zwischen der vertikalen Drehgeschwindigkeit und der Plattformgeschwindigkeit des MSS. Hierauf wird detaillierter im Abschnitt 2.3 eingegangen. Der Parameter Field of View (FoV), in Deutsch auch als Gesichtsfeld bezeichnet, gibt den maximalen vertikalen Messbereich im Profil an. Einen kompletten Messbereich mit 360° haben nur die reinen 2D-Modus Laserscanner, bei den Modellen welche im reinen 3D- bzw. im kominierten 2D-/3D-Modus arbeiten, ist das FoV mit 270 - 320° etwas eingegrenzt. Die höchste Anzahl an Pixeln mit 129600 pro Profil, wird beim Surphaser 400 erreicht. Hierdurch ist eine sehr hohe Auflösung, entspricht einem Abstand von 1 mm in einer Distanz von 20 m am Objekt, möglich (Basis Software, Inc., 2017). Mit maximal 2 Mio Punkte in der Sekunde erreicht der Leica RTC360 die schnellste Lasermessrate. Dieser benötigt für einen Fulldome-Scan (inklusive eines sphärischen High Dynamic Range (HDR)-Bildes) mit einer geometrischen Auflösung von 6 mm bei 10 m weniger als 2 min, siehe Leica (2018). Hinsichtlich maximaler Reichweite ist der Z+F IMAGER 5016 mit bis zu 365 m führend (Z+F, 2018).

2.4.2 Sensorkalibrierung

Die Sensorkalibrierung bei Laserscannern erfolgt im Regelfall durch die Hersteller und die Angaben, welche diese zu ihren Modellen im Rahmen der Datenblätter angeben, setzen eine solche voraus. Der Begriff Sensorkalibrierung bezieht sich auf die reine interne Kalibrierung des Lasersanners. Hiermit soll eine klare Abgrenzung zu der später im Detail beschriebenen Systemkalibrierung, welche sich auf die Ausrichtung zwischen unterschiedlichen Sensoren in einem MSS bezieht, ermöglicht werden. Streng genommen stellt der Laserscanner an sich schon ein solches MSS dar, sind hier doch eine Elektro-Optische Distanzmessung (EDM)-Messeinheit, die Encoder für Erfassung von hz und v ein Neigungsmesser sowie zusätzlich Sensoren für Global Navigation Satellite System (GNSS), Inertial Measurement Unit (IMU) oder Temperaturmessung, verbaut. Die Kalibrierung der einzelnen Komponenten, wird im Rahmen von einigen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht. In Neitzel (2006) erfolgt die Bestimmung von Achsenabweichungen durch Messungen in zwei Lagen. Lindstaedt u.a. (2012) untersuchen die Genauigkeiten bei der Distanzmessung beim TLS. Auch seitens der Hersteller sind entsprechenden Erläuterungen gegeben, siehe hierzu Walsh (2015) (Leica) und Mettenleiter u. a. (2015) (Z+F). Jedoch werden bewusst nicht alle Details der internen Sensorkalibrierung veröffentlicht. Für die meisten Nutzer ist dies auch nicht primär von Relevanz. Für sie ist eher von Interesse, ob der verwendete Laserscanner die entsprechenden Genauigkeitsanforderungen, welche sich aus einer konkreten Aufgabenstellung ergeben, erfüllt. Daher sollte eine Überprüfung entsprechend einfach und kostengünstig durchzuführen sein.

Ein "Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern" wird im Merkblatt 7-2014 des DVW e. V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement beschrieben (Neitzel u. a., 2014). Für die internationale standardisierte Umsetzung des Feldprüfverfahrens terrestrischer Laserscanner gibt es eine International Organization for Standardization (ISO)-Norm (ISO, 2018). Eine Alternative bietet der Entwurf für eine "Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von Terrestrischen Laserscanner-Systemen" nach Kern (2010). Diese basiert auf der Idee von Heister (2006) und stellt ein Labor-Prüfverfahren dar, durch welches die Vergleichbarkeit verschiedener TLS-Spezifikationen untersucht werden kann (Gottwald u. a., 2008). In Wunderlich u. a. (2013) wird ein Vergleichskonzept für terrestrische Laserscanner erarbeitet und auf verschiedene Systeme angewendet.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist das Thema Sensorkalibrierung von hoher Relevanz. So existieren neben den bereits benannten Ansätzen zur Kalibrierung von Einzelkomponenten weitere Ansätze von Rietdorf (2005), Reshetyuk (2006), Lichti (2007), Gordon (2008) und Kern und Huxhagen (2008), welche die Sensorkalibrierung als Ganzes thematisieren. Da die interne Funktionsweise eines Laserscanners meist einen "Black-Box-Charakter" besitzt, wird ein Ansatz mit dem Ziel verfolgt, eine Vielzahl der Einflussgrößen in einem gemeinsamen mathematischen Korrekturmodell zu beschreiben. In Muralikrishnan u. a. (2015) wird ein geometrisches Fehlermodell vorgeschlagen, durch welches ein Vielzahl der internen systematischen Abweichungen berücksichtigt werden. Auch einige der aktuellen Kalibrieransätze wie z. B. Medić u. a. (2017) und Wang u. a. (2017) verfolgen diesen Ansatz. Die wesentlichen Parameter einer Sensor-internen Kalibrierung, sind in der Tabelle 2.2 aufgelistet. Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine Sensorkalibrierung und die damit verbundene Bestimmung der Abweichungen essentiell sind. Hierdurch wird seitens der Hersteller sichergestellt,

Parameter	beeinflusste Messgröße
Zielachsabweichung	hz
Kippachsabweichung	hz
Drehachsabweichung (Taumeln)	hz, v
Indexabweichung des Vertikalkreises	v
Strahlneigung in horizontaler Richtung	hz, v
Strahlneigung in vertikaler Richtung	hz, v
Additionskonstante Distanzmessung	D

Tabelle 2.2: Auflistung der wesentlichen Sensor-internen Abweichungen bei Laserscannern.

dass die angegebenen Genauigkeitsangaben erreicht werden. Gleichzeitig wird somit auf Seiten der Anwender bzw. deren Auftraggebern die entsprechende Sicherheit und das Vertrauen geschaffen.

2.4.3 Messunsicherheiten

Das grundlegende Prinzip beim TLS ist das polare Messverfahren, welches im Abschnitt 2.4.1 erläutert wurde. Daher beziehen sich die Genauigkeits- bzw. Unsicherheitsangaben meist auf die erfassten polaren Messgrößen d, hz und v. Hierzu sind in den Datenblättern der meisten Hersteller entsprechende Angaben zu finden. Für eine weitere Verwendung bzw. Deutung der Angaben, ist jedoch eine genaue Spezifizierung dieser Angaben von besonderen Interesse. Es ist jedoch festzustellen, dass die Angaben in den Datenblättern nicht immer vergleichbar sind und eine standardisierte Form nicht existiert. In den meisten Fällen werden 1σ -Werte angegeben, was bedeutet, dass unter der Annahme der Normalverteilung ca. 68% der Messwerte innerhalb dieses Intervalls liegen. Jedoch gibt es hier Unterschiede in der Zuordnung zu einem Bezugswert. Dies können z. B. der wahre Werte bzw. eine Sollwert, der Erwartungswert oder der Mittelwert sein. Die Bedeutung wird im Abschnitt 2.2 und ihre Berechnung im Abschnitt 3.2.1 erläutert.

Um ein einheitliches Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit zu gewährleisten, wird hier auf die im GUM beschriebene Vorgehensweise zurückgegriffen. Hierin wird für die genaue Beschreibung der Unsicherheit der Parameter Standardunsicherheit $u(x_i)$ eingeführt, welche der entsprechenden Messgröße zugeordnet wird. Bei der genauen Bestimmung wird in Type A und B unterschieden, vergleiche hierzu Abschnitt 2.2. Da es sich bei den hier angegebenen Werten um Herstellerspezifikationen handelt sind diese vom Typ B und es sind entsprechende Annahmen zur Verteilungsfunktion bzw. zum Vertrauensniveau zu treffen. Als einziger der hier aufgeführten Hersteller, gibt Leica beim Modell RTC360 an, dass sich die Spezifikationen auf den GUM beziehen.

Bei den Angaben für die Messung der Distanz d wird von allen Herstellern in einen systematischen und einem zufälligen Anteil unterschieden. Letzterer wird auch als Distanzrauschen bezeichnet. Einen Überblick zu den Angaben, welche den Datenblättern der Modelle entnommen sind, ist in der Tabelle 2.3 gegeben. Es ist erkenntlich, dass alle Hersteller eine ähnliche Größenordnung (< 0,5 mm), welche mit $1\sigma = 68\%$ spezifiziert ist, erreichen. Da keine weiteren Angaben gegeben sind wird hier eine Normalverteilung angenommen. Der Wert entspricht somit einer empirischen Standardabweichung, welche sich nach der Gleichung 3.12 ergibt. Es ist jedoch dabei zu beachten, dass die Angaben nur für die angegebenen Entfernungs- bzw. Grau- oder Reflexionswerte gelten.

Des Weiteren erfolgt für die Distanzmessung eine Angabe, welcher einen systematischen Anteil enthält. Die Werte, welche den entsprechenden Datenblättern entnommen wurden, sind in der Tabelle 2.4 dargestellt und werden mit u(d) bezeichnet. Bei Z+F wird dies als Linearitätsfehler bezeichnet. Hierbei handelt es sich um eine verbleibende restliche Abweichung, welche sich aus den Differenzen zwischen einer interferometrisch bestimmten Soll-Entfernung und den kalibrierten Werten des EDM vom Laserscanner ergibt. Die Berechnung erfolgt als Root-mean-square (RMS), siehe Gleichung 3.8. Die Angabe in den Datenblättern ist jedoch als Schwellwert, unter welchen alle der Differenzen liegen, zu deuten (Lipkowski und Mettenleiter, 2019). Daher ist im Falle der

Software, Inc., 2017)					
1σ [mm] @10 m	Leica		1σ [mm] @10 m	Surphaser	
	RTC360	P40		400	
78% Albedo	-	0,4	10% Reflektivität	0,4	
89% Albedo	0,4	-	90% Reflektivität	0,2	
1σ [mm] @10 m	Z+F IMAGER		Z+F PROFILER		
	5016^2	5010^{1}	9020^{2}	9012^{1}	
14% schwarz	0,3	0,5	0,3	0,5	
37% grau	0,25	0,4	0,2	0,3	
80% weiß	0,2	0,3	0,2	0,2	

Tabelle 2.3: Angaben zum Distanzrauschen nach Hersteller und Modellen, Leica P40 (Leica, 2016) + RTC360 (Leica, 2018), Z+F IMAGER 5010 (Z+F, 2010) + 5016 (Z+F, 2018), Z+F PROFILER 9012 (Z+F, 2012) + 9020 (Z+F, 2022b) und Surphaser 400 (Basis Software, Inc., 2017)

 1 Daten
rate 127 Pixel/Sek

² Datenrate 136 Pixel/Sek

Verwendung eine entsprechende Umwandlung in eine Standardunsicherheit, nach Gleichung 3.25 durchzuführen. Bei Leica wird explizit der Begriff Reichweitengenauigkeit verwendet, daher kann hier eine Verbindung mit systematischen Anteilen unterstellt werden. Unterschiede gibt es nur zwischen den Modellen, während beim Modell P40 das Vertrauensniveau direkt mit 1σ angegeben wird, ist es beim RTC360 mit 68% spezifiziert. Im zweiten Fall, ist daher der Wert um die Standardunsicherheit zu erhalten durch den Faktor 1,64 zu teilen, siehe auch Abschnitt 3.2.2. Beim Hersteller Surphaser wird die Formulierung "Evaluated with contrast target best fit" angegeben (Basis Software, Inc., 2017). Auch dies lässt vermuten, dass systematische Anteile vorhanden sind. Alle Hersteller geben Werte, welche im Bereich von < 1,2 mm liegen bzw. darunter an. Für die Leica Modelle bzw. beim Z+F IMAGER 5016 ist zusätzlich ein Parts per Million (PPM)-Wert angegeben. Dies scheint aufgrund der angegebenen Reichweiten, vergleiche Tabelle 2.4, sinnvoll. Für eine möglichst korrekte Angabe der Genauigkeit der Distanzmessung, sollten die Angaben zum Rauschen, sowie die, welche die systematischen Anteile enthalten, zusammengefasst werden. Hierbei kann nach dem Vorgehen zur Ermittelung einer kombinierten Unsicherheit $u_c(y)$ nach GUM verfahren werden, siehe 3.28. Bei den Angaben für die Messung von hz und v, hier mit u(hz, v)bezeichnet, ergeben sich Unterschiede. Während Z+F die Werte als RMS spezifiziert, werden bei der Leica P40 und dem Surphaser 400 1 σ Vertrauensintervall angegeben. Beim Leica RTC360 sind es 68%. Der Z+F PROFILER 9012 erreicht mit 0,02° den höchsten und die P40 von Leica mit $0,002^{\circ}$ die geringste Wert. Detailliertere Informationen zum Bestimmungsprozess bei Leica sind in Walsh (2015) gegeben. In der Tabelle 2.4 wurden die Angaben zusammengefasst.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit den aufgeführten Modellen eine 3D-Objekterfassung mit $\sigma_{3D} \leq 1$ mm möglich ist. Jedoch ist anzumerken, dass dafür die Entfernung zwischen Laserscanner und Objekt auf einen Bereich von < 10 m zu begrenzen ist. Für die Bestimmung der Gesamtunsicherheit der 3D-Objekterfassung wird im folgenden der Arbeit detaillierter eingegangen. Als Methoden sind hier die Varianz-Fortpflanzung (VF) und die MCS, welche im Abschnitt 3.2.3 erläutert werden, zu nennen. Für ersteres wurde das Vorgehen und ein Rechenbeispiel in Lipkowski und Mettenleiter (2019) gegeben.

Im Regelfall wird für eine Gesamtbetrachtung der 3D-Objektaufnahme die Betrachtung des einzelnen Sensors nicht ausreichend sein. Aufgrund von verschiedensten Anforderungen, wurden in den vergangenen Jahren unterschiedliche Messstrategien entwickelt. Diese können generell in s-TLS und k-TLS unterteilt werden. Das Stopp-und-Go Verfahren stellt dabei eine spezielle Form des s-TLS dar. Eine Übersicht der Strategien, sowie eine Einteilung in Trägerplattformen, Scan- und Registrierungsverfahren, wird in Holst u. a. (2015) gegeben und ist in der Abbildung 2.6 dargestellt.

Tabelle 2.4: Unsicherheitsangaben und -spezifikationen aktuell am Markt verfügbarer Laserscannermodelle aus dem High-End-Bereich, die Klassifizierung erfolgt in 2D-, 3D- bzw. kombinierten Modus, Leica P40 (Leica, 2016) + RTC360 (Leica, 2018), Z+F IMAGER 5010 (Z+F, 2010) + 5016 (Z+F, 2018), Z+F PROFILER 9012 (Z+F, 2012) + 9020 (Z+F, 2022b) und Surphaser 400 (Basis Software, Inc., 2017)

	2D-Modu	s	
Hersteller	Z+F PROFILER		
Modell	9012	9020	
u(v,hz) [°]	0,02	0,007	
Spezifikation		RMS	
u(d) [mm]	< 1,0	< 1,0	
Spezifikation	RMS (Li	$inearit $ ätsfehler $)^1$	
	2D/3D-	Modus	•
Hersteller	Leica	Z+F IMAGER	
Modell	P40	5016	5010
u(v,hz) [°]	0,002	0,004	0,007
Spezifikation	1σ (GUM)	RMS	
u(d) [mm]	1, 2 + 10 ppm	< 1, 0 + 10 ppm	< 1,0
Spezifikation	1σ (GUM)	RMS (Linearitätsfehl	$(er)^1$
3D-Modus			
Hersteller	Leica	Surphaser	
Modell	RTC360	400	
u(v,hz) [°]	0,005	0,007~(25")	
Spezifikation	Vertrauensniveau	1σ	
~ F	68% (GUM)		
u(d) [mm]	1,0+10 ppm	< 0,9 @ 15 m	
Spezifikation	Vertrauensniveau	Evaluated with contrast	
	68% (GUM)	target best fit	

 1 verbleibende Restsystematik nach Distanzkali
brierung (Lipkowski und Mettenleiter, 2019)



Abbildung 2.6: Übersicht der unterschiedlichen Aufnahmestrategien, Plattformen und Registrierungsverfahren beim TLS (Holst u. a., 2015).

2.5 Statisches terrestrisches Laserscanning und Lasertracking

Im Rahmen dieses Abschnittes wird das Vorgehen einer 3D-Objekterfassung mit s-TLS vorgestellt. Da dies in den seltensten Fällen aus einer Einzelmessung besteht, wird hier die gesamte Prozesskette betrachtet. Hierbei wird in die Einzelschritte Vorbereitung, 3D-Objektaufnahme, Datenprozessierung und Qualitätskontrolle unterschieden. Der Gesamtablauf ist in der Abbildung 2.7 dargestellt.

Vorbereitung	 Vorgaben Zeitlicher Rahmen Genauigkeitsanforderungen Detailgrad und Abdeckung Referenzsystem bzw. Realisierung 	 Planung Anzahl Standpunkte Wahl der Scanparameter Referenzierungsmethode Wahl Instrumentarium
3D-Objektaufnahme	 Vorarbeiten Realisierung Referenznetz Wahl + ggf. Vermarkung der Standpkte 	 Scanprozess Einzelmessungen (Laserscans) Referenzierungsmessungen
Daten- prozessierung	 Datenimport und Vorprozessierung Referenzierungsmessung Korrektionen & Reduktionen 	 Prozessierung 3D-Punktwolke Bestimmung Referenzierungsparameter Transformation Einzelmessungen
Validierung und Qualitätssicherung	 Genauigkeit Modellierung Gesamtunsicherheit SOLL/IST-Vergleich 	VollständigkeitAbdeckungDetailgrad

Abbildung 2.7: Ablaufdiagramm einer s-TLS-basierten 3D-Objektaufnahme.

Die einzelnen Schritte einer s-TLS-basierten 3D-Objekterfassung sollen in den folgenden Abschnitten 2.5.1 - 2.5.3 kurz beschrieben werden. Im Anschluss werden einige Sonderfälle des s-TLS erläutert, hierzu gehören Tachymeter und Lasertracker mit Scanfunktion (Abschnitt 2.5.4) sowie der Stopp-und-Go Verfahren (Abschnitt 2.5.5). Im abschließenden Abschnitt 2.5.6 wird Anwendbarkeit des s-TLS bei der 3D-Objekterfassung von industriellen Großstrukturen bewertet.

2.5.1 Vorbereitung und Objektaufnahme

Beim s-TLS kommt das im Abschnitt 2.4.1 beschriebene Messverfahren zum Einsatz. Der Laserscanner wird dabei auf einer statischen Plattform, hierzu gehören z. B. Stativ, Konsole oder Pfeiler, montiert. Je nach örtlichen Bedingungen und Objektgröße erfolgt die 3D-Erfassung meist durch mehrere Einzelscans auf unterschiedlichen Standpunkten. Die Einzelscans liegen zunächst nur im lokalen Scannerkoordinatensystem vor. Wird ein zusammenhängender Datensatz benötigt, welcher sich auf ein einheitliches Koordinatensystem bezieht, so sind die Einzelscans entsprechend in dieses zu Überführen. Dazu sind die Transformationsparameter, hierzu gehören je drei Translationen und Rotationen und ein Maßstab zu bestimmen. Der funktionale Zusammenhang, ist in der Gleichung 3.2 gegeben. Hierbei wird in die Bezeichnungen Georeferenzierung und Registrierung unterschieden. Im ersten Fall werden die Daten der Einzelscans in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert werden. Optional besitzt dieses einen Bezug zu einem Objekt. Als Beispiel ist hier ein Schiffskoordinatensystem zu nennen. Unter dem Begriff Registrierung wird nur die relative Ausrichtung der einzelnen Scanaufnahmen untereinander verstanden. Hierbei werden alle Scans in das lokale Koordinatensystem eines Masterscans, im Regelfall ist das der erste Standpunkt, überführt. Am Beginn des gesamten Arbeitsablaufes, stehen die Vorgaben, welche im Rahmen einer Aufgabenstellung übermittelt werden. Hieraus entsteht die Planung der Messung, welche versucht die Anforderungen bestmöglich umzusetzen. Es gelten die folgenden wesentlichen Fragestellungen:

- Welcher zeitliche Rahmen steht zur Verfügung?
- Welche Qualitätsanforderungen gibt es? Hierzu zählen Vorgaben bzgl.
 - Genauigkeit sowie
 - Detailgrad (Punktdichte) und Objektabdeckung (Scanbereich).
- Wird ein übergeordnetes Referenzkoordinatensystem bzw. dessen Realisierung benötigt?

Je nach Aufgabenstellung können die Einzelschritte der Durchführung dabei entsprechend variieren. Hierzu zählen beispielsweise die Anzahl der Standpunkte oder die Wahl des Instrumentariums bzw. der Scanparameter. Auch die Vorarbeiten und der eigentliche Scanprozess sind davon abhängig. Zu nennen sind z. B. die Realisierung des Referenznetzes oder die Wahl bzw. Vermarkung der Standpunkte. Der Scanprozess selbst, stellt eine wesentliche Stellschraube dar. Hiermit können die beiden Kriterien räumlichen Auflösung und Qualität der 3D-Objektaufnahme beeinflusst werden. Durch Auswahl entsprechender Scanparameter, wird die Zeitdauer eines Einzelscans und somit auch die Gesamtzeit der 3D-Objekterfassung beeinflusst. Exemplarisch sind an dieser Stelle die Zeiten für einen Vollscan mit einer Auflösung von 6 mm@10 m genannt. Der Z+F IMAGER 5016 benötigt hier mit der Qualitätseinstellung *normal* (Lasermessrate 25,4 kHz) 3:03 min und der Leica RTC360 0:50 min. Die kürzere Zeitdauer beim RTC360 wird durch die hohe Lasermessrate von 2 MHz erreicht, vergleiche Tabelle 2.1. Die vollständigen Zeitangaben für den Z+F IMAGER 5016 sind in der Tabelle A.1 und für die Leica RTC360 in der Tabelle A.2 zusammengefasst.

Eine große Ausdehnung sowie eine komplexe Form der Objekte stellen zum Teil anspruchsvolle Bedingungen an die 3D-Objektaufnahme dar. Hierzu gehören z. B. Verschattungen oder Vorgaben, welche die Geometrie und Genauigkeit betreffen. Beispielsweise sind hier der zu erwartende Auftreffwinkel und auch Überlappungen zwischen den Einzelscans zu nennen. Letzteres ist ein wichtiger Aspekt bei der Registrierung- bzw. Georeferenzierung. Daher stellt sich die Frage nach einer möglichst geeigneten Anzahl und einer optimalen Konstellation der Standpunkte. Werden diese nicht entsprechend gewählt, so kann sich ein erheblicher zeitlicher Aufwand ergeben. In die Planung ist jedoch mit einzubeziehen, dass die meisten Hersteller die Möglichkeit bieten, dass der Operateur vor Ort Teilbereiche definiert, welche dann gescannt werden. Somit muss nicht immer ein Vollscan durchgeführt werden, wodurch sich Zeitdauer und Datenmenge deutlich verringern.

Da eine Vorplanung oft sehr viel Erfahrung seitens der durchführenden Akteure bedarf, gab es in den letzten Jahren einige Bestrebungen seitens der Wissenschaft diese stärker zu automatisieren. Ein Thema ist die schon benannte Standpunktplanung bzw. -optimierung, welche noch meist intuitiv erfolgt. Dies verlangt jedoch viel Erfahrung seitens des durchführenden Personals. Um diese Aufgabe zu vereinfachen, wurden Methoden entwickelt, welche die Anzahl der Standpunkte und damit auch die Gesamtzeit minimieren. Auf Grundlage von Vorinformationen, wie z. B. ein bekanntes 3D-Modell (z. B. Computer-aided Design (CAD)), erfolgt anschließend eine Optimierung. In Wujanz und Neitzel (2015) wird ein kombinatorischer Ansatz vorgestellt, welcher Kombinationen von Standpunkten ermittelt, deren Punktwolken untereinander registrierbar sind. Darauf aufbauend wird die Gesamterfassungszeit für verschiedene Standpunktkonfigurationen berechnet. In Wujanz (2016) wird dieser Ansatz durch Nutzung von stochastischen Vorinformationen erweitert. Die Unsicherheiten der Distanzmessung werden durch ein intensitäts-basiertes stochastisches Modell bestimmt. Dieser Ansatz wird im späteren Verlauf erneut aufgegriffen und detaillierter erläutert.

2.5.2 Datenprozessierung

Wird davon ausgegangen, dass alle wesentlichen Korrektionen und Reduktionen, vergleiche hierzu die Abschnitte 2.4.1 und 2.4.2, im Rahmen der meist intern im Laserscanner stattfinden Prozes-
sierung erfolgten, verbleiben die Registrierung bzw. Georeferenzierung die wesentlichen Auswertungsschritte. Hierfür wurden in den letzten Jahren diverse Methoden entwickelt. Eine händische Ausrichtung der Einzelscans wird zwar durch einige Hersteller angeboten, jedoch ist dies für die meisten geodätischen Fragestellungen nicht ausreichend genau und bei einer größeren Anzahl von Einzelscans sehr arbeitsaufwendig. Die Methode wird daher meistens nur als Näherungsverfahren verwendet. Eine Klassifizierung der einzelnen Methoden erfolgt z. B. in Holst u. a. (2015) und Urbančič u. a. (2019). Zum einen wird in Flächen-, Geometrie-, Radiometrisch-basierte Methoden unterschieden. Diese werden vorrangig für eine Registrierung verwendet. Ist zusätzlich eine Georeferenzierung, d. h. die Überführung in ein übergeordnetes Koordinatensystem nötig, kommen vorrangig die Hardware- und Zielzeichen-basierten Methoden zum Einsatz. Auf die unterschiedlichen Verfahren sowie auf die Möglichkeit der Kombination wird hier im Folgenden kurz eingegangen.

Ein prominentes Beispiel der Flächen-basierten Methoden ist der Iterative Closest Point (ICP)-Algorithmus nach Besl und McKay (1992). Die grundlegende Idee ist, dass Korrespondenzen zwischen den Punkten (nächstgelegene Punkte) in den Punktwolken der Einzelscans bestimmt werden. Da die Informationen aus dem Objektraum kommen ist der Aufwand im Vergleich zu anderen Methoden relativ gering. Probleme können jedoch im Falle von unterschiedlichen Punktverteilungen zwischen den Einzelscans und bei der Verwendung von schlechten Näherungswerten entstehen. In den letzten Jahren gab es diverse Weiterentwicklungen und Optimierungen, detailliertere Informationen sind z.B. in Rusinkiewicz und Levoy (2001) und Date u.a. (2019) zu finden. Einen weitere Methode sind die geometrischen Primitive, wozu z. B. Ebenen (Rietdorf, 2005), (Wujanz u.a., 2018b) und Zylinder (Moritani u.a., 2018) zählen. Die entsprechenden Bereiche der geometrischen Elemente werden zunächst im Scan detektiert und anschließend über ein Matchingverfahren, welches meistens automatisiert abläuft, zusammengeführt. Im Anschluss daran erfolgt eine Blockausgleichung aller Scans, welche dann die Transformationsparameter ergeben. Diese werden anschließend verwendet, um die Einzelscans in einen definierten Masterscan zu registrieren. Es ist jedoch anzumerken, dass eine entsprechend unterschiedliche Ausrichtung und Anzahl von geometrischen Primitiven vorhanden sein muss. Werden z. B. ausschließlich senkrecht ausgerichtete Zylinder verwendet, ist die Translation in Z-Richtung schwer zu bestimmen Vorteilhaft gegenüber den Methoden welche auf dem ICP-Algorithmen basierenden ist, dass sich durch die Selektion der Geometrien die Datengröße und somit die Prozessierungszeit deutlich reduziert, siehe technet GmbH (2021). Des Weiteren gibt es radiometrische Methoden, welche auf etablierte Techniken aus dem Bereich des Bildmatchings basieren. Der grundlegende Ansatz ist, dass die erfassten 3D-Punktwolken in Intensitätsbilder umgewandelt werden. Anschließend erfolgt die Extraktion von Merkmalspunkten, mit welchen über Korrespondenzen die Transformationsparameter berechnet werden (Böhm und Becker, 2007). Jedoch kann es zu Verzerrungen, welche sich auf Grund der polaren sphärischen Abtastung ergeben, in den Bildern kommen. Um dies zu minimieren wird in Houshiar u.a. (2015) vorgeschlagen bekannte Methoden aus der Kartenprojektion zu verwenden.

Durch die Hardware-basierte Methoden bieten sich zusätzlich die Möglichkeit eine direkte Georeferenzierung durchzuführen. Sehr verbreitet dafür ist GNSS als Messverfahren. Da die industrielle Fertigung meist im Indoor-Bereich stattfindet, ist eine Verwendung hier nicht möglich. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit nur Verfahren, welche im Indoor-Bereich verwendet werden können, thematisiert. Generell ist in extern und intern zu unterscheiden. Bei ersteren wird zusätzliche, nicht mit der Plattform verbundene, Hardware verwendet. In Heikkilä u. a. (2010) kommt ein Tachymeter, welches zu einem an der Plattform montiertem Prisma misst, zur Anwendung. Dieses Prinzip verfolgen auch Duwe-3d AG (2014). Hier erfolgen die Messungen durch einen Lasertracker, welcher einige an einem Laserscanner befestigen Corner Cube Reflector (CCR) beobachtet. Bei der internen Methode wird zusätzliche Hardware auf der Plattform integriert. Hierzu gehören z. B. Gyroskope, IMU, Kompass, Kameras oder Profillaserscanner. Auf Grund vorhandener Sensorspezifischer Nachteile, wie z. B. der Drift bei einer IMU, werden meist mehrere Sensoren kombiniert. Ein aktuelles Beispiel, stellt der Leica RTC360 dar, in welchem Altimeter, Kompass, GNSS, IMU sowie drei Kameras integriert sind (Leica, 2018). Durch die Kombination werden zum einen ein optimierte Georeferenzierung bzw. Registrierung und zum anderen ein stark automatisierten Ablauf ermöglicht (Metzler, 2021).

Auch durch die Zielzeichen-basierte Methode kann sowohl eine Registrierung bzw. Georeferenzierung erfolgen. Sie hat sich frühzeitig etabliert und ist auf Grund ihrer Einfachheit ein sehr verbreitetes Verfahren für die Verknüpfung von unterschiedlichen Laserscans (Lichti und Skaloud, 2011). Hierbei werden die Mittelpunkte der Zielzeichen bestimmt und diese als Referenzpunkte für eine Transformation verwendet. Die Dominanz der Methode ist jedoch, aufgrund des Aufkommens der beschriebenen alternativen Methoden nicht mehr so ausgeprägt. Als ein wesentlicher Nachteil, ist der zusätzliche Arbeitsaufwand, welcher aus der Verteilung der benötigten Zielzeichen im Objektraum resultiert, zu nennen. Ist lediglich eine Registrierung von Interesse, so wird verstärkt auf die Flächen-, Geometrie-, Radiometrisch-basierten Methoden zurückgegriffen. Ist eine Georeferenzierung nötig, stellt diese Methode jedoch weiterhin den Standard dar. Hierbei werden die Zielzeichen in entsprechender Anzahl und Anordnung im Objektraum verteilt. Die Einmessung mit Bezug auf das übergeordnete Koordinatensystem kann z. B. per Tachymeter (Dreier u. a., 2021) oder Lasertracker (Stenz u. a., 2020) erfolgen. Generell wird in räumliche und ebene Zielzeichen unterschieden. Ein Beispiel für räumlichen Zielzeichen sind Kugeln. Hierbei werden aus dem erfassten Kugelpunkten der Mittelpunkt und der Radius geschätzt. Während der Radius eher als Qualitätsmerkmal für die Schätzung dient, werden die Koordinaten als Referenzpunkte für die Transformation verwendet. Detailliertere Informationen über diese Thematik sind in Brazeal (2013) gegeben. Des Weiteren werden ebene Zielzeichen verwendet, für welche in den letzten Jahren einige unterschiedliche Designs entwickelt wurden. Meist wird eine Ebene mit einer bedruckten Schwarz-/Weißteilung, dessen Kanten im Mittelpunkt schneiden, verwendet. Details über die Berechnung der Mittelpunkte sind in Lichti u. a. (2019) gegeben. Die Qualität wird dabei maßgeblich von der Anzahl der Pixel auf dem Zielzeichen bestimmt. Die Anzahl der Pixel kann über die Scanauflösung gesteuert werden. Neben einer möglichst genauen Realisierung des Zentrums, sind die Zentrierung und Ausrichtung des Zielzeichens von entscheidender Bedeutung. In Janßen u.a. (2019) werden einige am Markt verfügbare ebene Zielzeichen hinsichtlich dieser Kriterien untersucht und entsprechende Optimierungsansätze vorgestellt. Als Resultat präsentieren die Autoren ein Zielzeichen-Design bei der die Anzahl der Kanten auf acht erhöht wurde.

Da bei der 3D-Objekterfassung von industriellen Großstrukturen, wird im Regelfall ein übergeordnetes Koordiantensystem verwendet. Daher sind die erfassten Daten zu georeferenzieren. Zur Anwendung kommt hier standardmäßig die Zielzeichen-basierte Methode. In Stenz u. a. (2020) wird das Vorgehen einer 3D-Objekterfassung mit s-TLS unter Vorgabe einer entsprechenden Genauigkeitsanforderung von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm näher erläutert. Für die Georeferenzierung werden entsprechende Schwarz-/Weiß-Zielzeichen verwendet, welche auf ihrer Rückseite eine Halbkugel haben, dessen Radius sehr exakt dem eines 1,5 Zoll CCR entspricht. Der Unterschied beträgt dabei lediglich $\leq 0, 1$ mm (Stenz u. a., 2017). Durch diese Zielzeichen ist es möglich, die s-TLS-Daten mit Referenzpunkten, welche vorab durch eine Lasertracker hochgenau bestimmt wurden, zu georeferenzieren. Die Zielzeichen und ein entsprechendes magnetisches Nest sind in der Abbildung 2.8 dargestellt.



Abbildung 2.8: Darstellung eines Zielzeichens für das s-TLS.

Abschließend ist festzustellen, dass es eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Registrierung bzw. Referenzierung beim s-TLS gibt. Diese haben jeweils ihre Vor- und Nachteile, was seitens der Anbieter dazu führt, dass mehrere Möglichkeiten angeboten bzw. diese kombiniert werden. Als ein aktuelles Beispiel ist die Software Scantra der Firma technet GmbH zu nennen, hier werden die Einzelscans über Referenzebenen (Methode der Geometrischen Primitive) zusammengeführt. Somit ist eine Registrierung ohne künstliche Zielmarken möglich. Darüber hinaus ist die Zielzeichenbasierte Methode integriert. Hierdurch besteht die Möglichkeit den Datensatz im Rahmen einer Georeferenzierung in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu überführen (technet GmbH, 2021). Als genereller Trend lässt sich feststellen, dass sowohl für die Registrierung als auch bei der Georeferenzierung eine möglichst echt-zeitnahe Prozessierung bzw. eine hoher Automatisierungsgrad, angestrebt wird, siehe Held u. a. (2017) und Ullrich und Fürst (2017).

2.5.3 Validierung und Qualitätssicherung

Als abschließender Schritt bei der 3D-Objekterfassung erfolgt die Validierung und Qualitätssicherung der Daten. Für die Beschreibung der Qualität von Prozessen werden Qualitätsmerkmale verwendet. Diese umfassen z. B.:

- die Verfügbarkeit der Informationen,
- deren Aktualität beziehungsweise Gültigkeitsdauer und -bereiche sowie die
- Unschärfe und das Risiko sowie der Nutzen von Handlungen und Entscheidungen (Paffenholz u. a., 2017).

Das wesentlichste Ziel der Objekterfassung durch TLS ist die Bereitstellung von geometrische Informationen (3D-Punktwolke) bzw. die Ableitung von weiterführende Größen, wie z. B. Krümmungsradien oder Spaltmaße. Daher sind bezogen auf das TLS im Besonderen als Qualitätsmerkmale die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Daten zu nennen. Wie auch bei der Datenprozessierung (z. B. Registrierung bzw. Georeferenzierung) wird auch bei der Ableitung der Qualitätsmerkmale eine möglichst echtzeitnahe Bereitstellung angestrebt. Hieraus ergibt sich als wesentlicher Vorteil, dass eine zeitnahe örtliche Überprüfung der Daten ermöglicht wird. Dies hat zum Vorteil, dass beispielsweise das schon vor Ort entscheiden werden, ob und wo nötige Nacharbeiten erfolgen müssen. Hieraus ergibt sich bzgl. der durchgeführten Schritte die nötige Sicherheit und es wird Vertrauen zwischen den beteiligten Stellen geschaffen. Dies stellt auch einen wesentlichen Punkt der DIN EN ISO 9000:2015 "Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe"dar. Hier wird "Qualitätssicherung als Teil des Qualitätsmanagements, der auf das Erzeugen von Vertrauen darauf gerichtet ist, dass Qualitätsanforderungen erfüllt sind" (DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015) beschrieben. Das Erzeugen von Vertrauen erfolgt im Rahmen von geplanten sowie systematischen Tätigkeiten mit dem Ziel der Einhaltung von an die Qualität gestellten Anforderungen. Dabei wird die Summe aller Maßnahmen zur Sicherstellung einer konstanten Produktqualität unter Qualitätssicherung subsumiert (Paffenholz, 2015).

Die Bewertung der Vollständigkeit kann beispielsweise im einfachsten Fall durch den Operateur mit Hilfe einer optische Darstellung am Rechner erfolgen. Darüber hinaus sind aber auch rechnergestützte Analysen möglich. Als Beispiel ist hier die Überprüfung der Auflösung, z. B. über Berechnung der Punktabstände, zu nennen. Für die Angabe der Genauigkeit wird im Regelfall eine entsprechende Größe (Parameter) verwendet. Hierzu gehören z. B. Größen, wie Toleranzen oder die Standardabweichung. Da es sich beim TLS um ein 3D-Messverfahren handelt, stellt der Helmertsche Punktfehler eine gute Möglichkeit dar die punktbezogene (lokale) Genauigkeit auszudrücken. Liegt dieser vor, so kann ein Vergleich mit einem vorab definierten Schwellwert erfolgen. Dies hilft bei der Interpretation der Daten. Voraussetzung für die Bestimmung des Helmertschen Punktfehler ist die Ermittelung der Gesamtunsicherheit beim s-TLS. Da es sich auch hier um einen komplexen Vorgang handelt, ist die reine Betrachtung der Messunsicherheiten des Laserscanners, welche im



Abschnitt 2.4.3 erläutert werden, nicht ausreichend. Ein Überblick über die Einflüssen beim s-TLS ist in der Abbildung 2.9 gegeben.

Abbildung 2.9: Einflussgrößen beim s-TLS (Geist, 2017)

Die Darstellung der Einflüsse erfolgt in Form eines Ishikawa-Diagramms. Hierbei wird in die wesentlichen Gruppen Beobachter (Mensch), Auswertemethode, Sensor (Messgerät), Umgebung, Messobjekt und der Messmethode klassifiziert. Auf eine detaillierte Betrachtung wird an dieser Stelle verzichtet. Die Thematik wird jedoch im Rahmen des Kapitel 6 aufgegriffen. Thema ist hier die Unsicherheitsmodellierung für das k-TLS, bei welchem die 3D-Objekterfassung auch durch TLS erfolgt. Jedoch erweitert sich der funktionale Zusammenhang um weitere Prozesse. Hierzu zählen z. B. die Georeferenzierung der Plattform bzw. die Systemkalibrierung und Synchronisierung zwischen den einzelnen Sensoren. Auch diese sind für die Ermittelung der der Gesamtunsicherheit zu betrachten.

2.5.4 Tachymeter und Lastertracker mit Scanfunktion

Trimble SX12

Leica Nova MS60

In diesem Abschnitt soll auf Tachymeter- und Lasertrackermodelle, welche mit einer Scanfunktion ausgestattet sind, eingegangen werden. Da die Tachymeter bereits herstellerseitig mit einer reflektorlosen Distanzmessung ausgestattet sind, ist die Scanfunktionalität (vgl. Abschnitt 2.3) entsprechend einfach zu integrieren. Es ergeben sich jedoch Unterschiede im Vergleich zu den bereits vorgestellten Laserscannermodellen. In der Tabelle 2.5 sind die Parameter zweier Tachymeter (Trimble SX10 und Leica MS60) zusammengestellt. Hieraus wird erkenntlich, dass die Scangeschwindigkeit

2021a) und Trimble (Trimble, 2021) max. Scanrate Scanzeit Scanbereich Scanauflösung Tachymeter [kHz] [min] (hz/v) [°] [mm]

12

12

 $360 \ge 300$

360 x 140

50@50m

50@15m

26, 6

30

Tabelle 2.5: Darstellung der Parameter von scannenden Tachymetern der Hersteller Leica (Leica,

und die Punktauflösung geringer sind, als bei den in Tabelle 2.1 vorgestellten Laserscannern. Beim

Parameter Messung							
Scanrate [kHz]	1						
Scangeschwindigkeit (fast mode) $[s/m^2]$	< 10						
Scanbereich (hz/v) [°]	360 x 290						
Distanzmessbereich (Scanning) [m]	1,5 - 60						
Distanzmessbereich (Reflektor) [m]	0 - 80						
Genauigkeitsangaben							
Distanzrauschen ¹ [µm]	< 80						
absolute Genauigkeit ² [µm]	$<\pm$ 300						
Winkelgenauigkeit (2 Lagen) 34	$\pm~25~\mu\mathrm{m}\pm~5~\mu\mathrm{m/m}$						

Tabelle 2.6: Parameter und Genauigkeitsangaben des Leica ATS600 (Hexagon, 2021).

 1 Standardabweichung (1 σ) für ausgleichende Ebene (78% Albedo), Distanz 1,5 - 30 m, Standardmessmodus, Ziel ausgerichtet. 2 Maximale Abweichung (Maximum Permissible Error (MPE)) der absoluten Position der Ebene (78% Albedo), 1,5 - 30 m, 0 bis \pm 45° Auftreffwinkel.

³ typischer Wert

⁴ In Übereinstimmung mit American Society for Testing and Materials (ASTM) E3125-17, Tabelle 2.

Vergleich der Tachymetermodelle fällt auf, dass das Trimble SX12 einen größeren Arbeitsbereich bei der Vertialwinkelmessung als die Leica Nova MS60 besitzt. Dieser entspricht dem eines Laserscanners. Im Vergleich zur klassischen Tachymetermessung, wurde zwar die Messfrequenz bei der Streckenmessung erhöht, jedoch liegt sie unter der, welche für die klassischen Laserscannermodelle angegebene wurde. Hier werden Werte von maximal 1 - 2 MHz erreicht, siehe 2.1. Im Vergleich zum Laserscanning, ergibt sich bei einer ähnlichen räumlichen Auflösung, also eine höhere Aufnahmezeit. Das Trimble SX12 benötigt bei einer räumlichen Auflösung von 50mm@50m 12 min für eine Vollscan, während es beim Z+F IMAGER 5016 und der Leica RTC360 < 1 min sind, siehe Tabellen A.1 und A.2. Bei den Genauigkeiten erreichen die Tachymeter ähnliche Werte wie die Laserscanner. Für das SX12 gibt Trimble eine 3D-Messgenauigkeit (Standardabweichung zu einem Kugelziel) von 2,5 mm auf 100 m an, siehe (Trimble, 2021). Leica spezifiziert das Rauschen der Streckenmessung bei der MS60 mit 1,0 mm auf 50 m (1σ) , die Winkelmessung ist mit 0,3 mgon angegeben.

Der Vorteil scannender Tachymeter ist, dass neben der reflektorlosen 3D-Aufnahme die klassische Messung auf Reflektoren möglich ist. Dadurch kann eine direkte Stationierung im übergeordneten Referenzkoordinatensystem (Georeferenzierung) erfolgen. Dies trifft auch auf den Leica ATS600 (Lasertracker mit Scanfunktion) zu. Auch mit diesem ist eine Stationierung über Messungen zu CCR möglich. Die Parameter des ATS600, werden in der Tabelle 2.6 angegeben. Der ATS600 besitzt eine sehr hohe absolute Genauigkeit von < \pm 300 µm. Ähnlich wie bei den scannenden Tachymetern ist jedoch die Scanrate mit 1 kHz und somit auch die Scangeschwindigkeit mit < 10 s/m² geringer als die der klassischen Laserscanner.

Abschließend bleibt zu resümieren, dass die Scanfunktion bei Tachymetern und Lasertrackern eine sinnvolle Alternative zu den klassischen Laserscannern darstellt. Jedoch können diese nicht als gleichwertiger Ersatz angesehen werden. Aufgrund der geringeren Scangeschwindigkeit, ist eine 3D-Objektaufnahme von industriellen Großstrukturen mit einer Ausdehnung von bis zu 200 m sehr zeitintensiv. Für kleinere Bereiche, wie z.B. einzelne Bereiche bzw. Bauteile (Aufbauten) scheint die Verwendung jedoch sinnvoll. Ähnlich wie bei den Laserscannern, bleiben jedoch die Nachteile, wie Verschattungen durch Sichthindernisse und ein möglicher flacher Auftreffwinkel erhalten.

2.5.5 Stopp-und-Go Verfahren

Das Stopp-und-Go Verfahren stellt eine Sonderform des s-TLS dar. Der Ablauf des Scanvorganges erfolgt jedoch analog, wie im Abschnitt 2.4.1 beschrieben. In Lin u. a. (2013) wird das Stopp-und-Go Verfahren zwischen der klassischen s-TLS-basierten und der k-TLS-basierten Objektaufnahme eingeordnet. Das Stopp-und-Go Verfahren zeichnet sich durch eine höhere Effizienz im Vergleich zum klassischen, mit Stativ durchgeführten, s-TLS aus. Im Vergleich zum k-TLS werden eine höhere Stabilität und Genauigkeit (vergleiche Abbildung 2.13) erreicht. Hieraus ist abzuleiten, dass sich das Stopp-und-Go Verfahren besonders gut für die Erfassung von lang gestreckten Objekten mit erhöhten Genauigkeitsanspruch eignet. Analog zum klassischen auf einem Stativ basierenden s-TLS findet beim Stopp-und-Go Verfahren die Einzelmessung im dem Laserscanner in einem statischen Zustand statt. Der Unterschied besteht darin, dass der Laserscanner auf einer mobile Plattform montiert wird. Optional wird dieser mit weiteren Sensoren, wie z.B. IMU sowie mit einem Rechner verbunden, siehe Cefalu u.a. (2017). Neben einem schnelleren Wechsel zwischen den einzelnen Standpunkten entfällt ein kompletter Ab- und Aufbau des Messsystems. Hieraus ergibt sich zeitliches Einsparpotential. Für einen effizienten Gesamtablauf, ist zusätzlich darauf zu achten, dass für die Registrierung bzw. Georeferenzierung eine Methode gewählt wird, durch welches wenige zusätzliche Arbeitsschritte entstehen. Hier bietet sich die Hardware-basierte Methode an. Speziell die erwähnte Georeferenzierung per externen Sensor, wie Tachymeter oder Lasertracker, hat den Vorteil, dass diese direkt erfolgt. Eine Alternative stellt die Nutzung von zusätzlich im Laserscanner oder auf der Plattform integrierten Sensoren dar. Aus Kostengründen, wird hierbei jedoch meist auf Sensoren (z. B. IMU) aus dem low-Cost Bereich zurückgegriffen. Um die Genauigkeiten zu verbessern, wird ein weitere Methode zur Feinregistrierung bzw. -georeferenzierung verwendet. Die Ergebnisse aus der Hardware-basierten Lösung werden als Näherungswerte verwendet. Aus Effizienzgründen (keine zusätzlichen Referenzpunkte) bieten sich als weitere Methoden Flächen-basierten, wie z.B. ICP oder geometrische Primitive oder Radiometrisch-basierte an. Ist eine Georeferenzierung nötig, wird aber im Regelfall auf die Zielzeichen-basierten Methode zurückgegriffen werden, vergleiche Abschnitt 2.5.2.

Aktuell besteht klar der Trend zur automatisierten 3D-Objekterfassung. Dies stellt die Grundlage für eine möglichst autonome Arbeitsweise dar. Das Stopp-und-Go Verfahren bietet sich dafür ausdrücklich an. Als Voraussetzung müssen die Plattformen entsprechend so gestaltet werden, dass sie ihre Navigation eigenständig durchführen. Eine mögliche Anwendung sind besonders große Objekte bzw. Örtlichkeiten, wie z. B. unterirdische Stollensysteme. Darüber hinaus ist eine Anwendung in Bereichen, welche durch den Menschen nicht betreten werden dürfen möglich. In Nensel u.a. (2021) wird ein mobiles Robotersystem zur automatisierten Messwerterfassung, welches Vermessungsfahrten zum Monitoring von Gebirgsbewegungen automatisch wiederholt oder mittels Wegpunktnavigation erstmals durchführt, vorgestellt. Eine ähnliches Vorgehen wird in Nüchter u.a. (2013) beschrieben. Die mobile Plattfrom Irma3D, kann dabei ferngesteuert über einen Controler oder komplett autonom betrieben werden. Eine weitere Art einer mobilen Plattform ist der Spot der Firma Boston Dynamics. Dieser verfügt über vier Beine und führt eine Laufbewegung durch. Der Spot verfügt über einige Montageschienen und Schnittstellen, wodurch die Befestigen und Ansteuerung von zusätzlicher Hardware ermöglicht wird. Des Weiteren gibt es ein Software Development Kit (SDK), wodurch sich die Option ergibt eigene Anwendungen zu erstellen. Die maximale Nutzlast ist mit 14 kg angegeben (Boston Dynamics, 2021). Dies reicht aus um die meisten der aktuell am Markt verfügbaren Scannermodelle zu tragen. Viele der führenden Hersteller haben daher begonnen, eigene auf den Spot basierende mobile Plattformen mit ihren Laserscannermodellen auszustatten, siehe Faro (2021), Leica (2021b) und Trimble (2021). Es ist davon auszugehen, dass die entsprechenden Entwicklungen erst am Beginn stehen und zukünftig weitere Hardware hinzukommt und das Anwendungsspektrum sich somit noch erweitern wird. Eine weitere spezielle Anwendung stellt das RIEGL VMR Robotic Rail Sanning System dar. Hierbei handelt es sich um eine schienengebundene Plattform, welche zur 3D-Objekterfassung von Gleisbereichen eingesetzt wird. Die Plattform ist mit einem RIEGL VZ-400i Laserscanner ausgestattet. Im Stopp-und-Go Modus können bis zu 50 Scans pro Stunde durchgeführt werden. Die Registrierung der einzelnen Scanpositionen erfolgt mit hoher Präzision und vollautomatisch (RIEGL, 2021).

2.5.6 Resümee zum statischen Laserscanning

Abschließend lässt sich zur s-TLS-basierten Objektaufnahme festhalten, dass sich der Prozess in den letzten Jahren stark verändert hat bzw. optimiert wurde. Dies ist auf eine immer leistungsfähigere Sensorik, aber auch auf verbesserte Algorithmen zurückzuführen. Im Speziellen ist zu erwähnen, dass die Prozessierung der Registrierung bzw. Georeferenzierung verstärkt onboard und somit nahezu in Echtzeit erfolgt. Des Weiteren sind auch bei der Vorplanung (Standpunktoptimierung) und bei der Durchführung, wo ein Trend zu autonomen Systemen zu beobachten ist, Fortschritte sichtbar. Je nach Aufgabenstellung verbleiben jedoch einige Herausforderungen. Hierzu zählen beispielsweise:

- Vermeidung eines flachen Auftreffwinkels und von Verschattungen,
- Vermeidung einer unregelmäßigen Punktdichte resultierend aus unterschiedlichen Objektabständen,
- Minimierung der redundanten Daten (teilweise Voraussetzung für die Registrierung bzw. Georeferenzierung) und
- Reduktion des Arbeitsaufwandes bei der Georeferenzierung bei gleichbleibender Genauigkeit.

Daraus lässt sich die Motivation ableiten, dass k-TLS als eine Alternative zu betrachten. Da hierdurch eine Objekterfassung aus der Bewegung möglich ist, scheint es aus Effizienzgründen vorteilhaft. Jedoch ergeben sich hierdurch zusätzliche Aufgabenfelder, welche zu lösen sind. Hierzu gehören z. B. die Synchronisierung und Systemkalibrierung, welche Voraussetzung für den Einsatz von unterschiedlichen Sensoren sind. Auch für die Georeferenzierung (Tracking) der mobilen Plattform ergeben sich besondere Herausforderungen. Diese sowie die grundlegende Funktionsweise beim k-TLS werden im nächsten Abschnitt erläutert und dargestellt.

2.6 Kinematisches terrestrisches Laserscanning

Das k-TLS kann grundlegend in zwei Arten unterteilt werden. Bei der ersten, ist das Objekt in Bewegung und wird durch einen stationären Sensor erfasst. Die zweite Art, welche ausschließlich im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wird, ist der Sensor in Bewegung und das Objekt in Ruhe. Zunächst werden das grundlegende Prinzip und die erfolgten Entwicklungen näher erläutert. Eine der wesentlichen Aufgaben beim k-TLS ist die Georeferenzierung der mobilen Plattform. Daher werden die grundlegenden Methoden und Umsetzungen hier kurz erläutert. Abschließend wird auch das k-TLS hinsichtlich seiner Eignung bei der 3D-Objekterfassung von industriellen Großstrukturen bewertet.

2.6.1 Messprinzip und Stand der Entwicklungen

Für die Erfassung wird ein Laserscanner auf einer mobilen Plattform montiert und am Objekt vorbei geführt. Dabei existieren unterschiedlichste Varianten für die oszillierende bzw. rotierende Ablenkeinheit des Laserscanners, welche in der Abbildung 2.10 dargestellt sind.

Am häufigsten verwendet bei der k-TLS-basierten 3D-Objektaufnahme, wird das in der Abbildung 2.10 mittig dargestellte Prinzip. Hierbei rotiert der Laserscanner um seine Kippachse, wodurch die Objekterfassung im Profilmodus erfolgt. Durch die Bewegung der Plattform wird dieses zu einer räumlichen Kurve, welche als Helix bezeichnet wird. Das Prinzip ist in der Abbildung 2.11 dargestellt.



Abbildung 2.10: Ablenkungsvariationen beim k-TLS, links: oszillierend um eine Achse, mittig: rotierend um eine Achse, rechts: rotierend um zwei Achsen (Vennegeerts, 2011).

In den 1990er Jahren und in den 2000er Jahre erfolgten im wissenschaftlichen Bereich einige Entwicklungen zu k-TLS-basierten MSS, exemplarisch sind hier Heister u. a. (1995), Hesse (2007) und Gräfe (2008) zu nennen. In den anschließenden 2010er Jahren erfolgte ein sehr großer Fortschritt, bei der Entwicklung von k-TLS-basierten MSS. Hieraus entstanden nun immer mehr kommerziell verwendetet Systeme. Beispielhaft sind hier das Mobile Straßenerfassungssystem (MoSES), welches zur Überwachung des Straßenraum und Tunneln mit anschließender Querschnittsanalyse oder Lichtraumauswertung eingesetzt wird, genannt (3D Mapping Solutions, 2022). Ein Überblick über weitere k-TLS-basierte MSS wird in Puente u. a. (2013) gegeben.



Abbildung 2.11: Das Prinzip der k-TLS-basierten Objekterfassung (Hesse, 2007)

Neben den reinen 2D-Laserscannern, welche im Profilmodus arbeiten, stellten die in den letzten Jahren entwickelten Fächerscanner eine Alternative für die erfassenden Einheit bei den k-TLS-basierte MSS dar. Hierbei wird das Lasersignal in mehrere parallele Linien aufgeteilt. Ein Beispiel ist der Puck (ehemals VLP-16) von Velodyne, welcher 16 Zeilen hat. Vorteilhaft hierbei ist, dass dadurch ein größerer Flächenabschnitt pro Scanumdrehung erfasst wird. Der Puck verfügt im Vergleich zu den Laserscannern im High-End-Bereich über eine geringe Genauigkeit, vergleiche Tabellen 2.3 und 2.4. Sie beträgt ± 3 cm und wird vom Hersteller als typische Genauigkeit spezifiziert. Vorteilhaft sind sein relativ geringes Gewicht mit ~830 g und der im Vergleich zu den Modellen des High-End-Bereichs vergleichsweise geringe Preis. Daher gibt es bereits vielseitige Verwendungen. Beispiele hierfür sind z. B. Robotik, Autonome Steuerung, Smart Cities und Building Information Modeling) (BIM) (Velodyne, 2021).

2.6.2 Arten der Georeferenzierung

Eine wesentliche Voraussetzung bei der k-TLS-basierten 3D-Objekterfassung ist, dass Position und Orientierung der mobilen Plattform bekannt sein müssen. Dies wird als Georeferenzierung bezeichnet. In Neitzel und Neumann (2013) wird dabei in direkte und indirekte Methoden unterschieden. Diese sollen hier im Folgenden kurz erläutert werden. Im Rahmen der Abbildung 2.12 wurden die möglichen Plattformen bzw. deren Bewegungsformen und sowie die Arten der Georeferenzierung strukturiert dargestellt.



Abbildung 2.12: Methoden der Georeferenzierung beim k-TLS für den Indoor-Bereich nach Neitzel und Neumann (2013)

Eine Möglichkeit der Georeferenzierung ist die *indirekte Methode*. Grundlegender Ansatz hierbei ist die Verwendung von geometrischen Informationen aus dem Objektraum. Ein einfaches Beispiel ist eine Ebene, bei welcher die Bedingungen formuliert wird, dass die erfassten Punkte in dieser liegen. Im Falle von k-TLS kann dies verwendet werden, um die Trajektorie rückwirkend zu verbessern. In Vogel (2020) wird ein Ansatz vorgestellt, welcher die resultierenden impliziten Beobachtungsgleichungen und die nichtlinearen Restriktionsgleichungen innerhalb eines iEKF modelliert. Bureick u. a. (2019) zeigen, dass diese Art von Georeferenzierung, welche ausschließlich auf TLS-Daten basiert, möglich ist. Hierzu werden geometrische Vorinformationen, hier speziell Ebenen, welche einem Gebäudemodell entstammen, verwendet.

In Vennegeerts (2011) wird die Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung vorgestellt, bei der die vom Laserscanner erfassten Daten zur Verbesserung der kinematischen Parameter genutzt werden. Als weitere Methode ist der Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-Algorithmus nach Leonard und Durrant-Whyte (1991) zu nennen. Hierbei werden die Objekterfassung und die Schätzung der Trajektorie miteinander verbunden. Durch die immer wiederkehrenden Punktmessungen wird durch eine Minimierung der Punktabstände die Schätzung der Position ständig verbessert. In den meisten Fällen handelt es sich dabei zunächst jedoch nur um eine relative Referenzierung, welche mit der Registrierung beim s-TLS zu vergleichen ist. Ist eine Georeferenzierung nötig, so kann dies z.B. durch die im Abschnitt 2.5.2 beschriebene Zielmarken-basierte Methode oder über den Einsatz von zusätzlicher Hardware, wie z.B. GNSS und IMU erfolgen. Da der Fokus dieser Arbeit auf jedoch auf Anwendungen im Indoor-Bereich liegt, wird diese Art nicht weiter betrachtet. Mögliche Sensoren, welche zur Anwendung kommen können, sind z.B. IMU, Winkelencoder, Odometer, Kompass, Neigungsmesser, zusätzliche Zeilenscanner oder Kameras. Der Einsatz von zusätzlicher Sensorik auf der Plattform (onboard), stellt für sich auch ein Verfahren der Georeferenzierung dar. Dies ist den direkten Methoden zuzuordnen, siehe Abbildung 2.12. In den letzten Jahren wurden jedoch diverse k-TLS-basierte MSS entwickelt, welche auf einen SLAM-basierten Algorithmus aufbauen und zusätzliche Sensorik verwenden. Analog zum s-TLS, ist auch beim k-TLS der Trend zu beobachten, dass mehrere Methoden bei der Georeferenzierung kombiniert werden.

Des Weiteren sind unterschiedliche Formen von Tragesystemen zu beobachten. Eine Option stellen Rückentrage-Systeme dar. Hierzu gehören z. B. BMS3D-HD von Viametris (ViAmetris, 2019) und der Pegasus von Leica (Leica, 2015). Eine leichte Abwandlung, stellt das Schulter-getragene System VLX 2.0 von NavVis dar. Optional wurde bei diesem System eine Tastspitze integriert. Hierdurch besteht die Möglichkeit über Referenzpunkte anzumessen und somit die erfassten Daten zu georeferenzieren (NavVis, 2022b). Des Weiteren existieren sogenannte Trolley-Systeme, Beispiele hier sind IMS3D von Viametris (ViAmetris, 2018), TIMMS von Allterra (AllTerra, 2019) und M6 von NavVIS (NavVis, 2022a). Beim letzterem ist eine Verknüpfung der erfassten Daten mit einem übergeordneten Referenzsystem über Bodenkontrollpunkte möglich. Des Weiteren existieren noch sogenannte Handgetragene-Systeme, hierzu gehören der ZEP von GeoSLAM (GeoSLAM, 2022) und der Leica BLK2Go (Leica, 2020). Um eine Aussage zur Genauigkeit einer 3D-Objekterfassung mit SLAM-basierten Verfahren zu treffen, sind die örtlichen Gegebenheiten, das eingesetzten Instrumentarium und schließlich die Art der Prozessierung näher zu betrachten. Daher kann hier allgemein nur ein Genauigkeitsbereich angegeben werden. Die Spanne reicht von von wenigen Zentimetern bis in den oberen Millimeterbereich. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf NavVis (2021) verwiesen. Hier wurden Untersuchungen zu den erreichbaren Genauigkeiten einer SLAM-basierten Objekterfassung durchgeführt. Als Referenzdatensatz für einen Cloud-to-Cloud Vergleich wurde eine mit s-TLS erfasste Punktwolke verwendet. Zusätzlich wurden Kontrollpunkte verwendet, welche vorab per Tachymeter erfassten wurden. Zusammenfassend wird angegeben, dass eine referenzierte Bestandsaufnahme mit einer Genauigkeit von 5 – 15 mm möglich ist. Die Spezifizierung erfolgt nach USIBD (2016) als Level of Accuracy (LOA) 30 mit 2σ , bedeutet dass 95% der Werte liegen in diesem Bereich.

Eine weitere direkte Methode der Georeferenzierung, stellt die Verwendung von externen Sensoren dar. Zu nennen sind hier z.B. Tachymeter und Lasertracker. Die modernen Instrumente verfügen über einen Servoantrieb und eine automatische Zielerkennung, welche es ermöglichen ein bewegliches Ziel zu verfolgen. Auf der mobilen Plattform werden dazu Prismen bzw. CCR angebracht. Hierdurch werden die polaren Messelemente Distanz D, horizontale Richtung hz und Vertikalwinkel v erfasst, welche anschließend in die kartesischen Koordinaten (X, Y, Z), siehe Gleichung 2.1, umgerechnet werden. Beispiele für k-TLS-basierte MSS, welche durch ein Tachymeter in Verbindung mit einem Prisma georeferenziert werden sind in Keller und Sternberg (2013) und Strübing (2015) dargestellt. In Dennig u.a. (2017) wird die Georeferenzierung eines Schienenmesswagens vorgestellt. Die Messungen erfolgen durch einen Lasertracker, welcher einen am Schienenmesswagen fest montierten CCR tracked. Die wesentlichen Unterschiede des Lasertrackers im Vergleich zum Tachymeter sind die höhere Messfrequenz und Genauigkeit. Darüber hinaus bieten einige Lasertracker die Möglichkeit, zusätzlich zu den drei polaren Messelementen, die drei Rotationen ω, φ, κ zu erfassen. Das bedeutet, dass somit eine direkte 6 DoF-basierte Referenzierung möglich ist. Beispiele hierfür, sind in Hartmann u. a. (2018b) und Vogel u. a. (2019) gegeben. Eine detailliertere Erläuterung des Prinzips erfolgt im Abschnitt 2.7.4.

2.6.3 Resümee zum Einsatz des kinematischen terrestrischen Laserscanning

Analog zum s-TLS haben sich in den letzten Jahren immer mehr Anwendungsmöglichkeiten für k-TLS-basierten MSS ergeben. Dies bedeutet jedoch, dass an die Erfassung vielseitige Anforderungen gestellt werden, welche auf Seiten der Entwickler zu lösen sind. In Hesse (2007) sind diese zusammenfasst:

- Modularität/Flexibilität (Standardsensorik, Schnittstellen),
- Skalierbarkeit (Erfassungsgeschwindigkeit, Datenvolumen),

- Mobilität (Stromversorgung, Gewicht),
- Kompaktheit (Zahl der Sensoren, all-in-one-Lösung),
- Zuverlässigkeit (Ausfalltoleranz, Redundanz der Sensorik) und
- Genauigkeit (Innere/äußere Genauigkeit des Systems, Synchronisierung).

Je nach Aufgabenstellung ist entsprechend zu unterscheiden, welche Art von Plattform und Sensorik eingesetzt wird. Einige Hersteller sind inzwischen dazu übergegangen den Aufbau ihrer Plattformen modular zu gestalten und somit mehrere Anwendungsgebiete zu erschließen. Aktuell ist am Markt eine großen Anzahl an k-TLS-basierten MSS vorhanden, eine Überblick ist in Klingbeil u. a. (2021) gegeben. Bezüglich der erreichbaren Genauigkeiten beim k-TLS ist festzuhalten, dass diese die des s-TLS überschreiten. Erreicht wird hier eine Spanne, welche von wenigen Dezimetern bis knapp unter einem Zentimeter reicht. Dies ist damit zu begründen, dass zusätzliche Einflüsse, welche aus der Systemkalibrierung, der Synchronisierung und aus der Georeferenzierung entstammen, hinzukommen.

Aktuell ist es mit keinem am Markt befindlichen k-TLS-basierten MSS möglich die eingangs der Arbeit definierte Zielstellung eine Gesamtgenauigkeitsanforderung von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm bei der 3D-Objektaufnahme zu erfüllen. Daraus leitet sich die Motivation ab, ein neuartiges MSS zu entwickeln, welches diese Vorgabe erfüllt und gleichzeitig eine möglichst effiziente Objekterfassung ermöglicht. In Abbildung 2.13 erfolgt eine Einordnung der im Abschnitt 2.3 vorgestellten Methoden für die 3D-Objekterfassung. Die Einteilung erfolgt nach Genauigkeit und Effizienz. Die Effizienz wird hier mit Zeit pro Fläche angegebenen. Es handelt sich dabei um eine relativen Vergleich und die Skalierung erfolgt von niedrig bis hoch. Im Falle des k-TLS ist die vorgegebene Zielstellung grafisch dargestellt.



Abbildung 2.13: Einteilung der Methoden für die 3D-Objekterfassung nach Effizienz und Genauigkeit.

2.7 Hochgenaues kinematisches terrestrisches Laserscanning im industriellen Umfeld

In diesem Abschnitt wird auf das Prinzip einer k-TLS-basierten Objektaufnahme eingegangen, mit welchem die im Abschnitt 2.1 erwähnten hohen Genauigkeitsanforderungen im Umfeld einer industriellen Fertigung erfüllt werden können. Neben der grundlegenden Idee, werden die Sensoren sowie die daran geknüpften Anforderungen, wie z. B. Systemkalibrierung und Synchronisierung und die Prozessierungsschritte erläutert.

Der grundlegender Ansatz, wurde erstmalig von Ehm und Hesse (2012) vorgestellt. Auch hier wird, wie im Abschnitt 2.6.1 beschrieben, ein Laserscanner, welcher im Profilmodus arbeitet, verwendet. Dieser ist auf einer mobilen Plattform montiert, welche am Objekt vorbei bewegt wird. Die Besonderheit des Ansatzes ist, dass die Georeferenzierung der mobilen Plattform durch einen Lasertracker in Verbindung mit einem 6 DoF-fähigen Sensor erfolgt. Somit wird eine direkte und hochgenaue Georeferenzierung ermöglicht, siehe Abbildung 2.14. Die Synchronisierung erfolgt durch ein Triggersignal, welches durch den Laserscanner am Nulldurchgang der Vertikalteilkreises (Beginn des Profils) generiert wird. Die Übertragung des Signals zum Lasertracker wird über ein Koaxialkabel realisiert. Nach Eingang des Signals am Lasertracker führt dieser die Georeferenzierungsmessung auf den am Laserscanner fest montierten 6 DoF-fähigen Sensor durch.



Abbildung 2.14: Das Prinzip einer k-TLS-basierten Objekterfassung nach Ehm und Hesse (2012).

Aufgrund der Tatsache, dass die Daten der verwendeten Sensoren zunächst nur in ihren Sensorinternen Koordiantensystemen vorliegen, sind diese entsprechend zu transformieren. Die Grundlagen sind im Abschnitt 3.1 zusammengefasst. Für die Transformation werden insgesamt sieben Parameter benötigt drei Translationen (t_x, t_y, t_z) und Rotationen $(\omega, \varphi, \kappa)$, sowie ein Maßstab m. Die Rotationen werden in der Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\kappa, \varphi, \omega)|_s^b$ zusammengefasst. Der funktionale Zusammenhang ist in der Gleichung 3.1 dargestellt. Wird der Maßstab als unveränderlich betrachtet, so gilt m = 1.

Die Überführung der erfassten Daten erfolgt durch eine mehrstufige Transformation. Im ersten Schritt werden diese vom Koordinatensystem des erfassenden Sensors s (hier Laserscanner), in das der mobilen Plattform, hier realisiert durch den 6 DoF-Sensor, transformiert. Da hierfür im Englischen die Bezeichnung body-frame üblich ist, wird dieser hier mit b bezeichnet. Für die Transformation eines Punktes $\boldsymbol{x}|_s$ ergibt sich

$$\boldsymbol{x}|_{\boldsymbol{b}} = \boldsymbol{t}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{z})|_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{b}} + \boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\kappa})|_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{b}} \cdot \boldsymbol{x}|_{\boldsymbol{s}}.$$
(2.2)

Die Translationen, hier als Vektor $t(x, y, z)|_s^b$ zusammengefasst, sowie die drei Rotationen $(\kappa, \varphi, \omega)|_s^b$

sind vorab im Rahmen einer Systemkalibrierung zu bestimmen.

In einem zweiten Schritt erfolgt der Übergang in das Koordinatensystem des Lasertrackers, hier mit l (lokal) bezeichnet. Es gilt

$$\boldsymbol{x}|_{l} = \boldsymbol{t}(x, y, z)|_{b}^{l} + \boldsymbol{R}(\omega, \varphi, \kappa)|_{b}^{l} \cdot \boldsymbol{x}|_{b}.$$

$$(2.3)$$

Die Parameter $t(x, y, z)|_{b}^{l}$ und $(\kappa, \varphi, \omega)|_{b}^{l}$ werden direkt aus der Messung des Lasertrackers auf den 6 DoF-fähigen Sensor gewonnen.

Liegt ein Referenzkoordinatensystem r vor, erfolgt eine dritte Transformation durch

$$\boldsymbol{x}|_{r} = \boldsymbol{t}(x, y, z)|_{l}^{r} + \boldsymbol{R}(\omega, \varphi, \kappa)|_{l}^{r} \cdot \boldsymbol{x}|_{l}.$$

$$(2.4)$$

Dabei ergeben sich die Parameter $\mathbf{t}(x, y, z)|_l^r$ und $(\kappa, \varphi, \omega)|_l^r$ aus der Stationierung des Lasertrackers. Grundlage hierfür ist das Prinzip der freien Stationierung, für welches im 3D-Fall Messungen zu mindestens drei gut verteilen Referenzpunkten durchzuführen sind.

Zu Erreichung der Gesamtgenauigkeitsanforderung von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm sind die Transformationensparameter entsprechende genau zu bestimmen. Die Translationen sollten daher auf wenige 10^{-1} mm und die Rotationen mit wenigen Milligon bestimmt werden. Wie dies erfolgt, wird in den nächsten Abschnitten beschrieben. Hierzu zählen die Laserscanner-basierte 3D-Objekterfassung, die Systemkalibrierung und Synchronisierung sowie die Georeferenzierung der Plattform.

2.7.1 TLS-basierte 3D-Objekterfassung

Aufgrund der hohen Gesamtgenauigkeitsanforderungen bei der 3D-Objektaufnahme von industriellen Großstrukturen, wird die Auswahl des Laserscannermodelles entsprechend eingeschränkt. Die verwendbaren Modelle sind dem High-End-Bereich zuzuordnen. Die Spezifikationen aktuell am Markt verfügbarer Modelle, sind in Tabelle 2.1 (Parameter), sowie in den Tabellen 2.3 und 2.4 (Genauigkeiten) dargestellt. Des Weiteren muss der gewählte Laserscanner im 2D-Modus betrieben werden können, damit das im Abschnitt 2.6.1 beschriebene Prinzip der k-TLS-basierten Objektaufnahme umgesetzt werden kann. Weitere Kriterien für die Auswahl, können die Abmaße, das Gewicht, die möglichen Drehraten und die Integrierbarkeit in eine mobile Plattform sein. Mit letzteren sind z.B. die Art der Datenübertragung (Kabel, WLAN), die Verfügbarkeit von gängigen Schnittstellen und die Stromversorgung gemeint. Als mögliche verwendbare Modelle sind hier von Z+F der IMAGER 5010 und 5016 bzw. der PROFILER 9012 und 9020, sowie von Leica die P40 aufzuzählen. Es ist zu erwähnen, dass die reinen 2D-Laserscanner einen größeren vertikalen Scanbereich (hier 360°) und die höchsten Rotationsgeschwindigkeiten mit bis zu 267 rps bieten. Letzteres ist besonders bei höheren Geschwindigkeit der Plattform von Relevanz, da sich hierdurch geringere Abstände zwischen den einzelnen Profilen realisieren lassen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Modelle Z+F IMAGER 5010 und 5016 verwendet. Beide können im Profilmodus betrieben werden, die Drehgeschwindigkeiten sind mit 12, 25 und 50 rps beim IMAGER 5010 (Z+F, 2010) und 7, 14, 27 und 55 rps für den IMAGER 5016 (Z+F, 2018) angegeben.

2.7.2 Systemkalibrierung und Synchronisierung der Sensoren

Aufgrund der festen Montage der T-Probe am Laserscanner wird hier der Maßstabsfaktor mit m = 1 festgesetzt. Für die Überführung der erfassten Daten vom Sensorkoordinatensystem des Laserscanners s in das Plattformkoordinatensystem b, hier realisiert durch die T-Probe, gilt somit die Gleichung 2.2. Als Transformationsparameter müssen dazu die 6 DoF, welche sich aus den drei Translationen $(t_x, t_y, t_z)|_s^b$ und drei Rotationen $(\omega, \varphi, \kappa)|_s^b$ ergeben, bestimmt werden. Dies erfolgt im Rahmen einer Systemkalibrierung. In dieser Arbeit wird dazu der RG-basierten Ansatz aus Strübing und Neumann (2013) verwendet. Aus praktischen Gründen werden hierfür RE verwendet. Die Genauigkeitsanforderungen für die Bestimmung der 6 DoF leiten sich aus den vorgegebenen

Gesamtanforderungen der 3D-Objektaufnahme ($\sigma_{3D} \leq 1 \text{ mm}$) ab. Die Abweichungen bei den Translationen wirken diese sich direkt auf die transformierten 3D-Punkte aus.

Im Falle der Rotationen ist dies als deutlich kritischer zu bewerten, da diese von der Distanz zwischen Laserscanner und Objekt abhängen. Beispielhaft sei hier eine Abweichung von 6 mgon angenommen. Hieraus ergibt sich in einer Entfernung von 10 m eine Abweichung von 1 mm am Objekt. Daraus folgt, dass die Translationen im Bereich von 10^{-1} mm und die Rotationen im Bereich von ≤ 6 mgon zu bestimmen sind. Für die Bestimmung der 6 DoF bedeutet dies, dass diese mit der entsprechenden Sorgfalt und Genauigkeit durchzuführen ist.

Aufgrund der Bewegung der Plattform, ist eine exakte zeitliche Zusammenführung der Messwerte der unterschiedlichen Sensoren von wesentlicher Relevanz. Dieser Vorgang wird als Synchronisierung bezeichnet. Eine einfache und zugleich sehr exakte Umsetzung, stellt die Nutzung eines Impulses (Hardwaretrigger) dar. Der Vorteil dieser Methode ist, dass eine nachträgliche Zusammenführung zwischen einzelnen unterschiedlichen Zeitsystemen entfällt. Bei dem eingangs des Abschnittes 2.7 vorgestellten Prinzip, wird der Laserscanner als Taktgeber verwendet. Konkret, wird bei jedem Nulldurchgang (Start des Profils) des Spiegels am Vertikalkreis ein Transistor-Transistor-Logik (TTL) Impuls erzeugt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass alle oben benannten Laserscannermodelle über diese Möglichkeit verfügen. Die Übertragung des TTL-Signals zwischen Laserscanner und Lasertracker erfolgt über ein Koaxialkabel. Nach Detektion des TTL Impuls, wird die 6 DoF-Messung durch den Lasertracker ausgelöst. Diese Art wird als ereignisgesteuerte Registrierung bzw. Georeferenzierung bezeichnet (Hennes u.a., 2014). Angestrebt wird eine möglichst echtzeitnahe Druchführung. Das bedeutet, dass die Daten innerhalb eines a-priori definierten Zeitintervalls erhoben oder verarbeitet werden. Der Zeitunterschied, welcher zwischen Eintreffen eines Ereignisses und der definierten Reaktion des Systems entsteht wird als Latenzzeit bezeichnet (Stempfhuber, 2004). Er kann als qualitatives Maß interpretiert werden, welches die Leistungsfähigkeit des Systems beschreibt. Hierbei muss das System aber nicht zwingend so schnell wie möglich auf ein Ereignis reagieren, sondern die Reaktion muss innerhalb einer vorgegeben Zeitspanne erfolgen. Bei Systemen zur Motoransteuerung werden nach Wörn und Brinkschulte (2005) Latenzzeiten von wenigen us als echtzeitfähig definiert. Die wesentlichsten Abweichungen, im Sinne von Latenzen, bei der Synchronisierung entstehen durch die folgenden Einflüsse:

- Verzögerung bei der Signalerzeugung
- Verzögerung im Kabel
- Steilheit der Flanke des Pulssignals
- Verzögerungen beim Signalempfang

Eine Abschätzung der Verzögerungen, welche aus Erzeugung und Empfang des Signals resultieren, ist schwierig, da hierfür oft die genauen Kenntnisse der technischen Umsetzung des Herstellers fehlen. In Müller-Stoy (1986) wird jedoch abgeschätzt, dass die Verzögerung wenige ns bis 100 ns betragen kann. Die Verzögerung im Kabel hängt von den leitenden Materialien ab und liegt laut Balch (2003) typischerweise bei 5 ns pro Meter Kabel. Durch eine fehlerhaft ausgeprägte Steilheit der Flanke beim Signal kommt es zu Verzögerungen von 0,5 µs (Hennes, 2014). Bei Verwendung eines 30 m langes Kabels beträgt die Gesamtverzögerung 0,75 µs. Hieraus resultiert bei einer Plattformgeschwindigkeit von 1 m/s eine Abweichung 0,75 µm, was als vernachlässigbar zu werten ist. Einen wesentlich signifikanteren Einfluss, hat eine fehlerhafte Zuordnung der erfassten Scanprofile mit den entsprechenden Georeferenzierungsmessungen. Dies ist von entscheidender Relevanz und wird durch das folgende Rechenbeispiel verdeutlicht. Angenommen wird eine Geschwindigkeit der mobile Plattform von 1 m/s. Die Rotationsgeschwindkeit des Laserscanners beträgt 50 Hz, woraus sich eine Umlaufzeit von 20 ms ergibt. Die hieraus resultierende Verschiebung am Objekt zwischen zwei benachbarten Profilen beträgt 2 cm. Dies kann nicht vernachlässigt werden. In Dorndorf u. a. (2015) wurde im Rahmen von Testmessungen mit einem k-TLS-basierten MSS nachgewiesen, dass die detektierte Anzahl der Georeferenzierungsmessungen die der erfassten Profile übersteigt. Als Ursache wird vermutet, dass der Laserscanner während der Warm- und Auslaufphase schon einige TTL-Signale erzeugt. Um eine exakte Zuordnung zu erreichen, schlagen die Autoren vor, mit dem k-TLS-basierten MSS eine Trajektorie von ca. 45° zu einer ebenen Wand im Hin- bzw. Rückweg zu fahren. Im Nachgang können dann die erfassten Laserscannerprofile gegenüber den Georeferenzierungsmessungen entsprechend verschoben werden. Fallen die erfassten Punktwolken des Hin- und Rückweg exakt zusammen, so ist von einer exakten Zuordnung auszugehen, siehe Abbildung 2.15.



Abbildung 2.15: Das Prinzip der exakten Zuordnung zwischen den Laserscannerprofilen und der Georeferenzierungsmessung. Darstellung einer gescannten Wand (Blaue Linie Hinweg und rote Linie Rückweg) mit einer Verschiebung von 9 Profilen (Abbildung mittig) und 10 Profilen (Abbildung rechts) (Dorndorf u. a., 2015).

Auch im Rahmen dieser Arbeit wurde so vorgegangen, da für die Messung immer mehr TTL-Signale als Profile detektiert worden sind. Die Anzahl schwankte für beide Modelle Z+F IMAGER 5010 (Messung mit 50 rps) und 5016 (Messung 55 rps) zwischen drei und vier. Es wurde bestimmt, dass die zweite Georeferenzierungsmessung (TTL-Signal) zum ersten Profil gehört. Somit wurde die erste sowie die letzten zwei bis drei Georeferenzierungsmessung nicht verwendet.

2.7.3 Georeferenzierung der Plattform

Nach Eingang des Triggersignals am Lasertracker führt dieser die Georeferenzierungsmessung auf einen 6 DoF-fähigen Sensor durch. Im Rahmen dieser Arbeiten werden hierfür ein Leica AT960 und eine T-Probe verwendet.

Das Prinzip der T-Probe ähnelt dem der Tracker-Machine control Sensor (T-Mac). Während der T-Mac hauptsächlich in der Automation, z.B. in der Robotersteuerung eingesetzt wird, ist die T-Probe als Handsensor, welcher für eine punktuelle 3D-Aufnahme genutzt wird, konzipiert. Die Unterschiede der T-Probe zur T-Mac sind:

- geringeres Gewicht,
- Kabellose Verbindung mit dem AT960 und
- zwei Befestigungsmöglichkeiten (Mountpoints) für eine variable Tastspitze.

Mit Hilfe einer Tastspitzkalibrierung wird der Offset zwischen dem fest in der T-Probe integrierten CCR und dem Ende der Tastspitze bestimmt. Des Weiteren ergibt sich hierdurch die Orientierung des lokalen Koordinatensystems, hier mit b bezeichnet. Je nach Mountpoint (Befestigung der Tastspitze) an der T-Probe ergibt sich eine unterschiedlich Orientierung des Koordinatensystems, siehe Abbildung 2.16.



Abbildung 2.16: Darstellung der beiden T-Probe Mountpoints 1 (links) und 2 (mittig) mit entsprechender Orientierung des Koordinatensystems b bzw. der Montage der T-Probe (ohne vorderer Teil der Tastspitze) am Rahmen mit Laserscanner (rechts).

Auch im Vorfeld der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen erfolgte eine Kalibrierung der Tastspitze. Um eine bessere Montage der T-Probe am Laserscanner zu ermöglichen, wurde der vordere Teil der Tastspitze jedoch wieder demontiert, siehe Abbildung 2.16. Da die Daten der Kalibrierung auf dem an der T-Probe verbleibenden Stylus gespeichert sind, kann diese trotzdem weiter verwendet werden. Somit ist eine 6 DoF-Georeferenzierungsmessung weiterhin, mit den in der Tabelle 2.7 angegebenen Genauigkeitsspezifikationen, möglich. Es muss lediglich beachtet werden, dass sich die erfassten Daten weiterhin auf das Koordinatensystem (Body-Frame b), welches sich weiterhin am nun imaginäre Ende der Tastspitze befindet, beziehen. Dies ist bei der weiteren Datenprozessierung und bei der Durchführung der Systemkalibrierung zu beachten. Bei der Georeferenzierungsmessung werden gleichzeitig je drei Translationen und Rotationen be-

	Position (gesamt) 1	$U_{X,Y,Z}$	=	\pm 15 μm $+$ 6 $\mu m/m$
AT960	Richtungs-/Winkelmessung 2	$U_{hz,v}$	=	$\pm~15~\mu\mathrm{m}+6~\mu\mathrm{m/m}$
	Distanz messung (IFM) $^{\rm 1}$	$U_{D_{IFM}}$	=	\pm 0,5 $\mu { m m}/{ m m}$
	Distanz messung (ADM) [1,5 - 50 m] $^{\rm 1}$	$U_{D_{ADM}}$	=	\pm 14 μm
	Zeitstempel			$< 5 \ \mu s$
T-Probe	Position (Erweiterung Punktgenauigkeit) 1	$U_{X,Y,Z}$	=	$\pm 35 \ \mu m$
T-Mac	Position (gesamt) 1	$U_{X,Y,Z}$	=	$\pm~15~\mu\mathrm{m}+6~\mu\mathrm{m/m}$
	Rotation 3	$U_{\omega,\varphi,\kappa}$	=	$\pm 0,01^{\circ}$

 Tabelle 2.7: Genauigkeitsspezifikationen des Leica AT960 und der 6 DoF-Messung (Hexagon, 2022a).

¹ Alle Angaben zur Genauigkeit beziehen sich auf eine maximal zulässige Abweichung (MPE). Typische Ergebnisse entsprechen der Hälfte der MPE.

² Winkelbestimmung in Querrichtung e_T nach ISO 10360-10:2016 Annex E, bezogen auf einen MPE für eine Lageabweichung $L_{Dia.2x1:P\&R:LT,MPE}$

³ Typische Genauigkeit

stimmt. Die Translationen $t(x, y, z)|_b^l$ werden nach Überführung der gemessenen polaren Elemente $(D, hz, v)|_b^l$ mit der Gleichung 2.1 erhalten. Die Messungen der horizontalen Richtung hz und des

Vertikalwinkels v erfolgen durch die im Lasertracker verbauten Encoder. Für die Bestimmung der Strecke D wird ein an der T-Probe fest verbauter CCR genutzt. Die besonders geringen Unsicherheiten (siehe Tabelle 2.7) bzw. die hohe Messgeschwindigkeit mit max. 1000 Hz, wird durch Fusion von Absolutdistanzmessung (ADM) und IFM erreicht. Dieses Verfahren wird als Absolutinterferometermessung (AIFM) bezeichnet (Hexagon, 2022d). Die Bestimmung der Rotationen erfolgt durch ein Kamera-basiertes Verfahren. Hierzu sind an der T-Probe zehn Light-emitting Diode (LED) angebracht, welche ein bekanntes Referenzpunktfeld signalisieren. Diese werden durch eine im Lasertracker verbaute Kamera getrackt. Die Ableitung der Rotationen $(\omega, \varphi, \kappa)|_b^l$ erfolgt durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt (Luhmann u. a., 2020, S. 579). Um größere Unsicherheiten bei der Bestimmung der Rotationen durch schleifende Schnitte zu vermeiden, beträgt der Messbereich in pitch $\pm 45^{\circ}$, in yaw $\pm 45^{\circ}$ und in roll $\pm 360^{\circ}$. Der Arbeitsbereich für die Messung zur T-Probe hängt von der Ausführung des Leica AT960 ab. Für die LR-Variante sind es 2-20 m und bei der XR-Variante erhöht sich der Einsatzbereich auf 2-30 m. Das Prinzip der 6 DoF-Georeferenzierung, sowie die einzelnen lokalen Koordinatensysteme der Sensoren, sind in der Abbildung 2.17 dargestellt.



Abbildung 2.17: Darstellung der 6 DoF-Georeferenzierungmessung vom Leica AT960 zur T-Probe. Rote Linie Messung AIFM zum CCR und grüne Linien Messung Kamera zu LED. Die Abbildung entstammt aus Hartmann u. a. (2018a) und wurde hier um die Koordinatensysteme des Laserscanners (s), der T-Probe (b), des Lasertrackers (l) und des übergeordneten Referenzsystems (r) ergänzt.

Für die Überführung der Daten vom lokalen Lasertrackersystem l in das übergeordnete Referenzkoordinatensystem (vergleiche Gleichung 2.4) werden je drei Translationen $t(x, y, z)|_l^r$ und Rotationen $(\omega, \varphi, \kappa)|_l^r$ benötigt. Dieser Vorgang wird auch als Stationierung des Lasertracker in r bezeichnet. Die Bestimmung der hierfür benötigten Transformationsparameter erfolgt durch eine räumliche Helmert-Transformation. Hierfür werden Messungen zu festen Referenzpunkten, welche mit CCR bestückt werden, durchgeführt. Es müssen dabei zumindest zwei Referenzpunkte und von einem dritten Referenzpunkte eine Koordinate (z. B. die z-Koordinate) bekannt sein. Optimalerweise werden jedoch mehrere Punkte verwendet. Dies führt zu einer Überbestimmung, was bedeutet, dass im Rahmen einer Ausgleichung die Transformationsparameter und deren Unsicherheiten ermittelt werden können. Für detailliertere Informationen zur Ausgleichung bei der räumlichen Helmert-Transformation wird auf Koch (2002) verwiesen.

2.7.4 Darstellung des k-TLS-basierten Multi-Sensor-System

In der Abbildung 2.18 ist eine Umsetzung des hier vorgestellten Prinzip des k-TLS-basierten MSS dargestellt. Die generelle Vorgehensweise erfolgt nach dem in Abschnitt 2.7 vorgestellten Prinzip. Die spezielle Umsetzung, ist in den Abschnitten 2.7.1 - 2.7.3 beschrieben. Aus dem dargestellten Stand ergeben sich jedoch einige wichtige Forschungshypothesen, welche im Folgenden hier kurz zusammengestellt und im weiteren Verlauf der Arbeit in den Kapiteln 4 - 6 aufgegriffen werden.

Systemkalibrierung und Synchronisierung der Sensoren

Die Bestimmung der 6 DoF zwischen dem lokalen Koordinatensystem des Laserscanners *s* und dem durch die T-Probe realisierten Body-frame *b* werden durch eine Systemkalibrierung bestimmt. Das primäre Ziel dabei ist, dass die eingangs des Abschnittes 2.7 aufgezählten Genauigkeitsanforderungen erreicht werden. Daher wird ein auf RG-basierte Ansatz verwendet. Als ein weiterer Aspekt wird eine möglichst effiziente Vorgehensweise betrachtet. Beide Aspekte werden im Rahmen einer Optimierung der Anordnung der RG aufgegriffen. Die Parameter werden durch eine Ausgleichung in einem GHM bestimmt. Hierfür sind ein geeigneter funktionaler Zusammenhang und ein stochastisches Modell aufzustellen. Auf die Details wird im Rahmen des Kapitel 4 eingegangen.

Hochgenaue und Punktweise Georeferenzierung

Die durch den Lasertracker zur T-Probe durchgeführte Georeferenzierung stellt eine Möglichkeit für eine direkte hochgenaue Georeferenzierung dar. Durch die Trigger-basierte Umsetzung wird eine hohes Maß an Genauigkeit und Zuverlässigkeit gewährleistet. Da das Tiggersignal am Start des Profils ausgelöst wird, gilt dieser Zustand streng genommen nur für den ersten erfassten Profilpunkt. Da sich die Plattform beim k-TLS während eines Profils fortbewegt, ist diese Lösung nicht ausreichend. Speziell bei dynamischen Bewegungsformen, muss die Bewegungsänderung der Plattform mit betrachtet werden. Dies erfolgt durch ein Filtermodell, bei welchem auch die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Plattform geschätzt werden. Eine detailierte Darstellung des Ablaufes und der Prozessierung erfolgt im Kapitel 5.

Bestimmung der 3D-Gesamtunsicherheit des k-TLS-basierten MSS

Im abschließenden Kapitel 6 wird das Thema Qualitätssicherung der erfassten k-TLS-basierten Daten aufgegriffen. Dies ist von Bedeutung, bilden die 3D-Daten doch die Grundlage für weitere Arbeitsschritte bei der Produktion von industruiellen Großstrukturen. Hierfür werden die Unsicherheiten der einzelnen Teilschritte genauer spezifiziert und im Rahmen einer Unsicherheitsmodellierung zusammengefasst. Die hiermit ermittelte 3D-Gesamtunsicherheit, quantifiziert die erreichbare Genauigkeit der Einzelpunkte. Zur Validierung wird die ein Vergleich zu einem Referenzdatensatz durchgeführt.



Ref. Koord.syst. (r)

Abbildung 2.18: Das k-TLS-basierte MSS, bestehend aus Laserscanner, T-Probe und Lasertracker, abgeänderte Abbildung aus Hartmann u. a. (2019).

3 Mathematische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die mathematischen Grundlagen zusammengefasst. Diese bilden den theoretischen Hintergrund, auf welchem die Umsetzung der einzelnen Schritte in dieser Arbeit basieren. Hierzu gehört zum einen die räumliche Ähnlichkeitstransformation, durch welche der Übergang zwischen den einzelnen Koordinatensystemen beschrieben wird. Darüber hinaus werden die Grundlagen für den Umgang mit Unsicherheiten als auch Methoden für deren Fortpflanzung erläutert. Anschließend erfolgt die Darstellung der Parameterschätzung, im Detail wird der Ablauf einer Ausgleichung nach dem GHM erläutert. Des Weiteren folgt ein Abschnitt über die räumliche Bestimmung von Form und Lage von Objekten. Hier werden die Grundlagen, welche für eine Parameterisierung von geometrischen Objekt relevant sind, eingegangen. Dies bildet die Grundlage für Schätzung der RG, welche bei der Systemkalibrierung verwendet werden. Im Anschluss wird das Thema Filterung erläutert. Hier wird das Kalman-Filter bzw. seine speziellen Formen dargestellt. Diese bilden die Grundlage für die Implementierung eines Filtermodells zur punktweisen Georeferenzierung des hier verwendeten k-TLS-basierten MSS. Ein abschließender Abschnitt thematisiert die Genetischen Algorithmen, welche hier im Rahmen der Optimierung der Anordnung der RG verwendet werden.

3.1 Räumliche Helmert-Transformation

Die räumliche Koordinatentransformation ist definiert durch eine eindeutige Abbildungsvorschrift, bei welcher ein Punkt, welcher hier als Vektor mit $\boldsymbol{x}|_a = (X, Y, Z)|_a$ von einem Ausgangskoordinatensystem *a* in ein Zielkoordinatensystem *z* überführt wird. Der wesentliche funktionale Zusammenhang ist durch die folgenden Beziehung definiert:

$$\boldsymbol{x}|_{z} = \boldsymbol{t}|_{a}^{z} + m|_{a}^{z} \cdot \boldsymbol{R}|_{a}^{z} \cdot \boldsymbol{x}|_{a}.$$

$$(3.1)$$

Die benötigten Parameter sind drei Translationen t_X, t_Y, t_Z , welche im Vektor:

$$t|_{a}^{z} = [t_{X} \ t_{Y} \ t_{Z}]^{T}|_{a}^{z}.$$
(3.2)

zusammengefasst werden. Des Weiteren werden die drei Rotationen $(\omega, \varphi, \kappa)|_a^z$ um die x-, y- und z-Achse benötigt. Diese werden standardmäßig im dreidimensionalen Fall in der Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)|_a^z$ zusammengefasst. Diese kann auf unterschiedliche Weise aufgestellt werden, um welche Achsen gedreht wird, hängt dabei von der Rotationsreihenfolge ab. Bei Verwendung von Eulerwinkeln gilt

$$\boldsymbol{R}|_{a}^{z} = \boldsymbol{R}(\omega,\varphi,\kappa)|_{a}^{z} = \boldsymbol{R}(\kappa) \cdot \boldsymbol{R}(\varphi) \cdot \boldsymbol{R}(\omega).$$
(3.3)

Bei der Verwendung von trigonometrischen Funktionen lauten Rotationsmatrizen für die Einzeldrehungen um die drei Achsen des Zielkoordinatensystems

$$\boldsymbol{R}(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{R}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{R}(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
(3.4)

Dabei ist ω die Rotation um die x-Achse, φ um die y-Achse und κ um die z-Achse. Die Rotationsmatrizen sind sowohl für Rechts- als auch für Linkssysteme gültig. Rotationen mit positiven Vorzeichen sind im Rechtssystem entgegen dem Uhrzeigersinn definiert. Im Linkssystem wird bei positiven Winkeln mit dem Uhrzeigersinn rotiert. Die Rotationsrichtung wird erhalten, bei Betrachtung des Ursprungs entgegen der positiven Drehachse. Die einzelnen Rotationsmatrizen und damit auch die Gesamtrotationsmatrix sind orthonormal. Daher erfüllen sie die folgende Bedingungen

$$\boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{R}^{T} = \boldsymbol{R}^{T} \cdot \boldsymbol{R} = \boldsymbol{I} \quad \boldsymbol{R}^{-1} = \boldsymbol{R}^{T} \quad \text{und} \quad det(\boldsymbol{R}) = 1.$$
(3.5)

Eine Darstellung der Gesamtrotation zwischen a und z, welche aus den drei Einzelrotationen von $(\omega, \varphi, \kappa)|_a^z$ besteht, erfolgt in der Abbildung 3.1. Die Abbildung zeigt eine Darstellung der einzelnen Koordinatenachsen, um welche die jeweiligen Rotationen erfolgen. Bei den Berechnungen ist darauf



Abbildung 3.1: Darstellung der Gesamtrotation zwischen dem Ausgangs- a und dem Zielkoordaintensystem z. Die Rotation erfolgt in der Reihenfolge einzelnen Rotationen in der räumlichen Transformation, Abbildung nach Le Scouarnec u. a. (2014).

zu achten, dass eine Rotation um $\varphi = 90^{\circ}$ bzw. 270° zu Mehrdeutigkeiten und somit zu keiner eindeutigen Lösung führt. Das Resultat ist, dass die Achsen der ersten und der dritten Rotation zusammenfallen, was zu einem Verlust eines Freiheitsgrades führt. Im Falle einer Kardanischen Aufhängung (Gimbal) wird dieses Phänomen als Gimbal Lock bezeichnet. Eine Möglichkeit dies zu umgehen, ist einer Vertauschung der erste und zweite Rotation bei der Aufstellung der Gesamtrotationsmatrix in Gleichung 3.3. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Quaternionen. Details hierzu können Luhmann u. a. (2020) entnommen werden.

Als siebenter Parameter, wird der Maßstabsfaktor $m|_a^z$ benötigt. Dieser kann entfallen bzw. wird mit $m|_a^z = 1$ angenommen, wenn mit kalibrierten Sensoren (hier vor allem in Bezug auf die Streckenmessung) gearbeitet wird. Diese Transformationen werden als konform oder orthogonal bezeichnet (Heunecke u. a., 2013).

3.2 Methoden der Unsicherheits-Modellierung

In diesem Abschnitt werden zunächst einige wesentliche statistische Grundlagen dargestellt. Darauf folgt eine kurze Beschreibung der Vorgehensweise nach dem GUM, welcher den Umgang mit Messunsicherheiten beschreibt. Abschließend werden die Methoden der Unsicherheitsfortpflanzung dargestellt, zu nennen sind hier die VF und die MCS.

3.2.1 Statistische Grundlagen

Eine Zufallsvariable X ist dadurch definiert, dass deren Messwerte x_i (Realisierung der Messgröße) von einem Zufallsexperiment abhängen. In der Geodäsie werden die Zufallsvariable auch mit L bzw. die Messwerte mit l_i bezeichnet (Heunecke u. a., 2013). Bei der späteren konkreten Umsetzung wird auf diese Notation übergegangen, in diesem Abschnitt erfolgt die weitere Darstellung wie ursprünglich eingeführt. Den einzelnen Messwerten wird eine WDF $P(x_i)$ zugewiesen. Dadurch ist dieses Konzept geeignet für den Umgang mit Messgrößen. Im Falle einer diskreten Zufallsvariable ist die Anzahl an möglichen Ergebnissen begrenzt, ein Beispiel hierfür ist das Werfen eines Würfels. Dem gegenüber stehen kontinuierliche Zufallsvariablen, welche unendlich viele Messwerte annehmen können. Im Rahmen der Geodäsie finden vor allem kontinuierliche Zufallsvariablen Anwendung. Bei genauerer Betrachtung müsste durch die begrenzte Auflösung der digitalen Messgeräte allerdings von diskreten Zufallsvariablen gesprochen werden. Die Zufallsvariable X ist folgendermaßen aufgebaut

$$\mathbf{X}_{(n,1)} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T \,. \tag{3.6}$$

Einer der geläufigsten Operatoren für Zufallsvariablen ist das arithmetische Mittel \bar{x} . Hier wird die Summe aller Messwerte durch deren Anzahl n dividiert. Der Erwartungswert einer Zufallsvariablen $E(\mathbf{X})$ berechnet sich analog für $n \to \infty$, es gilt

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$$
 bzw. $E(\mathbf{X}) = \mu_x = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i.$ (3.7)

Eine Alternative zum arithmetischen Mittel ist das quadratische Mittel. Dies wird in der englischen Literatur auch als RMS bezeichnet und ergibt sich aus der Summe der Quadrate der Zufallsvariablen. Es gilt

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i^2}.$$
(3.8)

Mit Hilfe des wahren Wertes \tilde{X} und μ_x lassen sich weitere Kenngrößen berechnen. Hierzu gehören die systematischen Abweichungen Δ_i , die zufälligen Messabweichungen ε_i , wahren Messabweichungen gen η_i und die Verbesserungen v_i . Hierfür gelten die folgenden Beziehungen

$$\Delta = \mu_x - \tilde{X}, \quad \varepsilon_i = x_i - \mu_x, \quad \eta_i = \varepsilon_i + \Delta = x_i - \tilde{X} \quad \text{und} \quad v_i = \bar{x} - x_i.$$
(3.9)

Eine grafische Darstellung der Zusammenhänge, welche die Beziehung zwischen dem Messwert x_i und dem Messergebnis repräsentiert durch \bar{X} und μ_x sowie \tilde{X} beschreiben, ist in der Abbildung 3.2 gegeben. Im Folgenden werden die Berechnung der Präzision und Genauigkeit, welche zur qualitativen Bewertung einer Zufallsvariable (Messwert) benötigt werden, dargestellt. Hierzu gehören die empirische s_0^2 und die theoretische Varianz σ_0^2 . Beide geben an, wie stark die x_i um einen Bezugswert streuen. Dies kann zum einen \bar{x} und zum anderen \tilde{X} sein. Für die weitere Deutung der verwendeten Qualitätsmaße ist besonders darauf zu achten, ob \bar{x} oder \tilde{X} verwendet wird. Dies ist gerade vor dem Hintergrund wichtig, da deren Bezeichnung in einigen Fällen fälschlicherweise gleichgesetzt wird.



Abbildung 3.2: Darstellung der skalaren Größen (Abweichungen), welche die Beziehung zwischen Messwert (x_i) und Messergebnis (\overline{X} bzw. μ_x) beschreiben (Heunecke u. a., 2013).

Das Prinzip hinter den beiden Berechnungswegen ist allerdings gleich. Die einzelnen Abweichungen der x_i zu \bar{x} bzw. \tilde{X} werden quadratisch aufsummiert und durch einen Faktor geteilt (Niemeier, 2008). Die empirische Varianz s_0^2 ergibt sich aus

$$s_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{bzw.} \quad s_0^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{X})^2.$$
 (3.10)

Im Falle von $n \to \infty$, ergibt sich die theoretische Varianz σ_0^2 aus

$$\sigma_0^2 = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \quad \text{bzw.} \quad \sigma_0^2 = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{X})^2.$$
(3.11)

Die Varianz, welche einen Bezug zu \tilde{X} aufweist, wird in der englischsprachigen Literatur als Root Mean Square Error (RMSE) bezeichnet. Durch Bildung der positiven Quadratwurzel der unterschiedlichen Varianzen lassen sich die empirische s_0 und die theoretische Standardabweichung σ_0 bilden. Es gilt

$$s_0 =_+ \sqrt{s_0^2}$$
 bzw. $\sigma_0 =_+ \sqrt{\sigma_0^2}$. (3.12)

Die Größen s_0 und σ_0 werden als Standardabweichung des Einzelwertes bezeichnet. Die Standardabweichung des Mittelwerts $s_{\bar{x}}$ und $\sigma_{\bar{x}}$ ergeben sich aus

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_0}{\sqrt{n}}$$
 bzw. $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}$. (3.13)

Eingangs wurde bereits erwähnt, dass den Messwerten der Zufallsvariablen eine Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist. Für eine Stichprobe $n \to \infty$ kann eine WDF f eingeführt werden. Die WDF f(x)gibt die Wahrscheinlichkeit für die Zufallsvariable X an. Das bedeutet, dass deren Realisierungen (Messwerte) x_i zwischen den Grenzen x und x + dx liegen (Niemeier, 2008), es gilt

$$P\{x \le x_i \le x + dx\} = f(x) \, dx. \tag{3.14}$$

In der Natur und besonders auch in der Geodäsie sind Zufallsvariablen häufig normalverteilt. Sie folgen einer WDF, die abhängig ist von dem Erwartungswert der Zufallsvariablen μ_x und dessen

Varianz σ^2 , es gilt

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}.$$
(3.15)

Wenn eine Zufallsvariable X normalverteilt ist, wird die folgende Schreibweise angewendet

$$\boldsymbol{X} \sim N(\boldsymbol{\mu}, \sigma^2). \tag{3.16}$$

Die Normalverteilung ist symmetrisch um den Erwartungswert. Die Wendepunkte der Funktion liegen bei $\mu - \sigma$ und $\mu + \sigma$. Die Wahrscheinlichkeit für einen Messwert im Intervall $[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$ liegt bei 68,27%. Wird das Intervall auf 2σ bzw. 3σ erweitert, so erhöhen sich die Wahrscheinlichkeiten auf 95,45% bzw. 99,73%.

Werden mehrere Zufallsvariablen zusammengefasst, so wird dies als Zufallsvektor bezeichnet. Dieser wird in Fällen eingeführt, in denen eine separate Betrachtung einer einzelnen Zufallsvariablen nicht adäquat ist. Ein Beispiel stellt eine Streckenmessung zu zwei unterschiedlichen Punkten vom selben Standpunkt dar. Die bisher vorgestellten Operatoren Erwartungswert und Varianz finden bei mehrdimensionalen Zufallsvariablen auch weiter ihre Anwendung. Darüber hinaus gibt es die empirischen Kovarianz s_{kl} oder die theoretischen Kovarianz σ_{kl} . Hierfür gilt

$$s_{kl} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_{k,i} - \bar{x}_k) (x_{l,i} - \bar{x}_l) \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{kl} = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_{k,i} - \bar{x}_k) (x_{l,i} - \bar{x}_l). \tag{3.17}$$

Mit ihnen wird die Abhängigkeit zwischen zwei einzelnen Zufallsvariablen (hier die Zufallsvariablen K und L) modelliert. Dies hat insbesondere eine starke Auswirkung auf die Fortpflanzung von Varianzen, siehe Abschnitt 3.2.3. Für eine bessere Interpretierbarkeit kann die Kovarianz zwischen zwei Zufallsvariablen mittels der Standardabweichungen normiert werden. Hieraus ergibt sich der Korrelationskoeffizient nach Pearson ρ , welcher einen festen Wertebereich besitzt. Es gilt

$$\rho_{kl} = \frac{\sigma_{kl}}{\sigma_k \cdot \sigma_l}, \quad \text{mit dem Wertebereich} \quad -1 \le \rho_{kl} \le 1.$$
(3.18)

Für die Kovarianz und die Korrelation gilt

$$\sigma_{kl} = \sigma_{lk} \quad \text{und} \quad \rho_{kl} = \rho_{lk}. \tag{3.19}$$

Ausgehend von einem Zufallsvektor kann mit den Varianzen und Kovarianzen zwischen den einzelnen Zufallsvariablen eine Varianz-Kovarianz-Matrix (VKM) Σ_{ll} gebildet werden. Auf der Hauptdiagonalen befinden sich die jeweiligen Varianzen und auf den Nebendiagonalen die Kovarianzen. Aufgrund der Eigenschaften der Kovarianzen, siehe Gleichung (3.19), sind VKM symmetrisch. Es gilt

$$\sum_{\substack{(n,n)}} \sum_{\substack{n=1\\(n,n)}} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}.$$
(3.20)

3.2.2 Darstellung nach dem Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

In den meisten Fällen wird eine Messgröße Y nicht direkt ermittelt, sondern ergibt sich aus einer Anzahl von N Eingangsgrößen X_1, X_2, \ldots, X_N . Zwischen diesen und Y besteht der folgende funktionalen Zusammenhang

$$Y = f(X) = f(X_1, \dots, X_n).$$
 (3.21)

Die Schätzung, welche der Messgröße Y zugeordnet wird, wird mit y bezeichnet. Analog sind x_1, x_2, \ldots, x_N die Schätzung für die N Eingangsgrößen. Der funktionale Zusammenhang ergibt sich dann zu

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N).$$
 (3.22)

In einigen Fällen wird die Schätzung y durch

$$y = \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} Y_k = \sum_{k=1}^{n} f(X_{1,k}, X_{2,k}, \dots, X_{N,k})$$
(3.23)

erhalten. Hierbei stellt y das arithmetische Mittel von n unabhängig bestimmen Größen Y_k aus Y dar. Alle haben die gleiche Unsicherheit und basieren auf einen kompletten Satz von Beobachtungen (Messgrößen), welcher jeweils aus N Einflussgrößen X_i besteht. Diese Art der Mittlung unterscheidet sich von $y = f(\bar{X}_1, \bar{X}_1, \ldots, \bar{X}_N)$, wobei

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{i,k}$$
(3.24)

das arithmetische Mittel der einzelnen Beobachtungen $X_{i,k}$ ist. Dies ist zu bevorzugen, sollte fnicht linear in den Eingangsgrößen X_1, X_2, \ldots, X_N sein. Im Falle eines linearen Zusammenhanges funktionieren beide Möglichkeiten. Jede der geschätzten Größen x_i besitzt eine ihr zugehörige Standardunsicherheit $u(x_i)$. Deren Verteilung ergibt sich aus der Verteilung der dazugehörigen Eingangsgröße X_i . Diese WDF basiert auf einer Reihe von Beobachtungen $X_{i,k}$ von X_i oder einer a priori Verteilung. Zum zweiten wird ein entsprechender Vertrauensbereich, welcher durch die Grenzen a_- bis a_+ definiert ist, mit angeben. Dies kann zum einen durch eine Multiplikation von $u(x_i)$ mit einem konstanten Faktor geschehen. Üblich ist hier das Ein-, Zwei- oder das Dreifache von $u(x_i)$. Des Weiteren kann das Vertrauensniveau auch durch einen Prozentwert angegeben werden, standardmäßig sind dies 68%, 95% oder 99%. Wenn nicht anders angegeben wurde, ist davon auszugehen, dass zur Berechnung der angegebenen Unsicherheit eine Normalverteilung verwendet wurde. Die $u(x_i)$ von x_i wird erhalten, wenn die angegebene Unsicherheit durch einen entsprechenden Faktor der Normalverteilung dividiert wird. Die Faktoren, die den drei im Abschnitt 3.2.1 angegebenen Vertrauensniveaus entsprechen, sind 1,64, 1,96 und 2,58. Wird eine Rechteckverteilung mit Vertrauensbereich ($a_+ - a_-$) angenommen, so ergibt sich $u(x_i)$ aus

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}.\tag{3.25}$$

Die geschätzte Standardunsicherheit, welche in Verbindung mit der Schätzung der Messgröße Y steht, vergleiche Gleichung 3.22, wird als kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ bezeichnet. Sie ergibt sich aus den Standardunsicherheiten $u(x_i)$ den einzelnen der geschätzten Größen x_i . Die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ bzw. kombinierte Varianz u_c^2 für eine Messgröße ergibt sich bei unabhängigen und unkorrelierten Eingangsgrößen durch Aufsummieren derer Varianzen

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i).$$
(3.26)

Wobei f sich aus der Gleichung 3.21 ergibt. Sind die Eingangsgrößen korreliert, erweitert sich die Gleichung 3.26 und es gilt

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) u(x_i, x_j).$$
(3.27)

Wobei der zweite Teil die Mischterme mit den Kovarianzen enthält. Die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ ergibt sich aus

$$u_c(y) = \sqrt{u_c^2(y)}.$$
 (3.28)

Abschließend ergibt sich die erweiterte Unsicherheit U aus

 $U = k \cdot u_c(y). \tag{3.29}$

Der Faktor k wird als Erweiterungsfaktor bezeichnet und im Regelfall zu 2 oder 3 gewählt. Für weitere Details wird auf JCGM (2008b) verwiesen.

3.2.3 Methoden der Unsicherheitsfortpflanzung

In diesem Abschnitt, werden Methoden für die Unsicherheitsfortpflanzung vorgestellt. Dies erfolgt am Beispiel der VF und MCS.

3.2.3.1 Varianzfortpflanzung

Die VF bietet die Möglichkeit die Varianz der abgeleiteten Größen aus denen der Eingangswerte zu berechnen. Durch die Unsicherheiten der Eingangsgrößen des funktionalen Modells ergeben sich auch Unsicherheiten der Ausgangsgrößen, welche es zu berechnen gilt. Zunächst wird von im Folgenden der allgemeine, funktionale Zusammenhang aufgestellt. Aus den n Eingangsgrößen X des funktionalen Zusammenhangs werden m Ausgangsgrößen Y berechnet. Diese Berechnung erfolgt über m funktionale Zusammenhänge in Abhängigkeit der Eingangsgrößen (Niemeier, 2008):

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{X}) = f_1(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ f_2(\mathbf{X}) = f_2(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ \vdots \\ f_m(\mathbf{X}) = f_m(X_1, X_2, \dots, X_n) \end{bmatrix}.$$
(3.30)

Ist der gegebenen Zusammenhang nicht-linear wird mittels Taylor-Reihenentwicklung linearisiert. Hier wird üblicherweise nach dem ersten Glied abgebrochen. Im dargestellten Fall wird die Linearisierung des funktionalen Zusammenhangs für eine einzelne Ausgangsgröße durchgeführt. Daher ergibt sich für den Zufallsvektor \boldsymbol{x} :

$$f(\boldsymbol{x}) = f(\boldsymbol{x}^{0}) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_{1}}\right)_{\boldsymbol{x}^{0}} \Delta x_{1} + \left(\frac{\partial f}{\partial x_{2}}\right)_{\boldsymbol{x}^{0}} \Delta x_{2} + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_{n}}\right)_{\boldsymbol{x}^{0}} \Delta x_{n}$$
(3.31)
mit $\Delta x = \boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}^{0}$.

Für die weitere Darstellung wird anstelle der Zufallsvariable X auf den konkreten Fall der Beobachtung L (Realisierung) übergegangen. Diese teilt sich entsprechend in stochastische Näherungswerte L^0 und den verkürzten Beobachtungsvektor l. Es gilt $L = l - L^0$, woraus sich

$$f(\boldsymbol{L}) = f(\boldsymbol{L}^0) + \left(\frac{\partial f}{\partial L_1}\right)_{\boldsymbol{L}^0} l_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial L_2}\right)_{\boldsymbol{L}^0} l_2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial L_n}\right)_{\boldsymbol{L}^0} l_n$$
(3.32)

ergibt. Durch die nicht-stochastische Eigenschaft von $f(L^0)$ braucht dieser Term nicht in die Betrachtung mit einbezogen werden. Nach Niemeier (2008) ergibt sich

$$\boldsymbol{a} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f}{\partial L_1}\right)_{\boldsymbol{L}^0} & \left(\frac{\partial f}{\partial L_2}\right)_{\boldsymbol{L}^0} & \cdots & \left(\frac{\partial f}{\partial L_n}\right)_{\boldsymbol{L}^0} \end{bmatrix}.$$
(3.33)

Im Falle der Erweiterung des Modells auf m Ausgangsgrößen, vergleiche Gleichung 3.30, welche durch n Beobachtungen beschrieben werden, können die partiellen Ableitungen oder Differential-Quotienten

$$a_{ij} = \left(\frac{\partial f_i}{\partial L_j}\right)_{L^0} \tag{3.34}$$

zur (m, n) Matrix A zusammengefasst werden. Diese wird als Jacobi-Matrix bezeichnet und ergibt sich aus

$$\mathbf{A}_{(m,n)} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^T & \mathbf{a}_2^T & \cdots & \mathbf{a}_m^T \end{bmatrix}.$$
(3.35)

Mit der allgemeinen Formel des VF-Gesetzes und der in Gleichung 3.20 aufgestellten VKM der Beobachtungen Σ_{ll} , ergibt sich die VKM Σ_{ff} der abgeleiteten Größen aus

$$\boldsymbol{\Sigma}_{ff} = \boldsymbol{A} \boldsymbol{\Sigma}_{ll} \boldsymbol{A}^T. \tag{3.36}$$

3.2.3.2 Monte-Carlo-Simulation

Die MCS ist eine numerische Methode zur Fortpflanzung von Unsicherheiten. Die Methode stellt eine Alternative zur VF dar. Für dieses Verfahren wird zum einen der funktionale Zusammenhang zwischen Eingangs- X und Ausgangsgrößen Y benötigt. Hierfür gilt die Gleichung 3.21. Zum anderen ist für die Eingangsgrößen eine geeignete WDF zu definieren. Diese wird über eine genügend große Anzahl an generierten Zufallszahlen M approximiert. Ein wesentlicher Vorteil der MCS ist, dass hierdurch das Bilden der partielle Ableitungen umgangen werden kann. Insbesondere im Falle von komplexeren Zusammenhängen stellt dies ein Erleichterung dar.



Abbildung 3.3: Darstellung unterschiedlicher WDF aus Schwarz (2004).

Neben des besseren Umgangs mit einem nicht-linearen funktionalen Zusammenhang können auch

abweichend von den Standardverteilungen, hierzu gehören die Normalverteilung und t-Verteilung, weiteren Verteilungsarten für der Einganggrößen verwendet werden. In Abbildung 3.3 sind beispielhaft neben der Normal- auch die Rechtecks- und Dreiecksverteilung dargestellt. Da in dieser Arbeit vorrangig mit normalverteilten Größen in der MCS gearbeitet wird, wird der Ablauf hier dargestellt.

Abbildung 3.4 zeigt den allgemeinen Ablauf einer MCS nach GUM. Neben dem funktionalen Modell nach Gleichung 3.36 sind auch die WDF der Eingangsgrößen X bekannt bzw. werden approximiert. Dafür werden M Zufallszahlen generiert. Dies erfolgt für die Normalverteilung mit dem Operator randn, welcher die Zufallszahlen aus der Standardnormalverteilung zieht. Durch die folgende Gleichung werden die M Zufallszahlen auf den Erwartungswert und die Varianz der Eingangsgröße angepasst. Es gilt

$$x_{i,k} = x_i + \sigma_{x,i} \cdot randn(0,1). \tag{3.37}$$

Wird als WDF die Gleichverteilung gewählt, wird abweichend der Operator rand verwendet. Im Anschluss wird durch das funktionale Modell die Berechnung der Ausgangsgrößen Y mittels einer Ausprägung der Zufallszahlen für alle Eingangsgrößen X durchgeführt. Dies erfolgt insgesamt Mmal mit unterschiedlichen Zufallszahlen. Auf die insgesamt M Ausprägungen der Ausgangsgrößen lassen sich die Operatoren Mittelwert und Varianz anwenden. Die Generierung von korrelierten Zufallszahlen kann über eine Cholesky-Zerlegung der VKM der Eingangsgrößen des funktionalen Modells erfolgen. Durch Bestimmung der Varianzen und Kovarianzen der M Ausprägungen der einzelnen Ausgangsgrößen lässt sich im Anschluss an die MCS eine VKM bestimmen. Auf eine anschließende Modellierung der Vertrauensintervalle wird in dieser Arbeit verzichtet.



Abbildung 3.4: Darstellung der Unsicherheitsschätzung durch MCS, Abbildung nach GUM aus JCGM (2008a).

3.3 Parameterschätzung im Gauß-Helmert-Modell

Das GHM stellt den allgemeinen Fall der Ausgleichungsrechnung dar (Niemeier, 2008). Der funktionale Zusammenhang enthält gleichzeitig mehrere Beobachtungen und Unbekannte. Für eine optimale Bestimmung der u unbekannten Parameter (x_1, \ldots, x_u) in einem überbestimmten System werden diese mit den vorhandenen n Beobachtungen (l_1, \ldots, l_n) in einem funktionalen Zusammenhang mit p linear von einander unabhängigen Bedingungsgleichungen gebracht. Für die Beobachtungen gilt im Folgenden der Vektor $\boldsymbol{l} = [l_1 \cdots l_n]^T$ und für die unbekannten Parameter der Vektor $\boldsymbol{x} = [x_1 \cdots x_u]^T$. Die einzelnen Bedingungsgleichungen ergeben sich durch die folgende implizite Darstellung:

$$\boldsymbol{f}(E(\boldsymbol{l}),\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{0}. \tag{3.38}$$

Im Einzelnen ergeben sich die Bedingungsgleichungen zu:

$$f_{1} [E(l_{1}, l_{2}, \dots, l_{n}), x_{1}, x_{2}, \dots, x_{u}] = 0$$

$$f_{2} [E(l_{1}, l_{2}, \dots, l_{n}), x_{1}, x_{2}, \dots, x_{u}] = 0$$

$$\vdots$$

$$f_{p} [E(l_{1}, l_{2}, \dots, l_{n}), x_{1}, x_{2}, \dots, x_{u}] = 0.$$
(3.39)

Da beim GHM die in Gleichung 3.39 formulierten Bedingungsgleichungen nicht linear sind, sind diese zu linearisieren. Hierfür werden passende Näherungswerte für l^0 und x^0 benötigt. Dadurch wird die Konsistenz des Modells bestimmt, was wiederum eine Voraussetzung für die Linearisierung darstellt, für diese gilt:

$$\boldsymbol{f}(E(\boldsymbol{l}),\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{l}^0 + \boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{l}, \boldsymbol{x}^0 + \boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{0}$$
(3.40)

$$\approx \boldsymbol{f}(\boldsymbol{l}^{0}, \boldsymbol{x}^{0}) + \underbrace{\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{l}}|_{\boldsymbol{l}^{0}, \boldsymbol{x}^{0}}}_{=:\boldsymbol{B}} \cdot \underbrace{(\boldsymbol{E}(\boldsymbol{l}) - \boldsymbol{l}^{0})}_{\boldsymbol{l} - \boldsymbol{l}^{0} + \boldsymbol{v}} + \underbrace{\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x}}|_{\boldsymbol{l}^{0}, \boldsymbol{x}^{0}}}_{=:\boldsymbol{A}} \cdot \underbrace{(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}^{0})}_{:=\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{x}}$$
(3.41)

$$\approx \underbrace{f(l^0, x^0) + B \cdot (l - l^0)}_{:=w \approx f(l, x^0)} + B \cdot v + A \cdot \Delta x$$
(3.42)

Durch eine Taylor-Entwicklung an der Stelle (l^0, x^0) werden die Gleichungen entsprechend linearisiert. Es können hierdurch schließlich die Bedingungsmatrix $B = \frac{\partial f(l,x)}{\partial l}|_{l=l^0,x=x^0}$, welche die partiellen Ableitungen nach den Beobachtungen enthält, sowie die Designmatrix $A = \frac{\partial f(l,x)}{\partial x}|_{l=l^0,x=x^0}$ mit den partiellen Ableitungen nach den Unbekannten gebildet werden. Des Weiteren ergibt sich der Widerspruchsvektor w aus:

$$\boldsymbol{w} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{l}^0, \boldsymbol{x}^0) + \boldsymbol{B} \cdot \left(\boldsymbol{l} - \boldsymbol{l}^0\right).$$
(3.43)

Das linearisierte funktionale Modell lautet

$$\boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{v} + \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{x} + \boldsymbol{w} = \boldsymbol{0}. \tag{3.44}$$

Dies wird auch als Bedingungsgleichung bezeichnet.

Neben dem funktionalen, wird auch ein stochastisches Modell aufgestellt, welches die Unsicherheiten der Beobachtungen beinhaltet. Diese werden durch die VKM Σ_{ll} zusammengefasst. Es ergibt sich

$$\boldsymbol{V}(\mathbf{l}) = \boldsymbol{\Sigma}_{ll} = \sigma_0^2 \cdot \boldsymbol{Q}_{ll} = \sigma_0^2 \cdot \boldsymbol{P}^{-1}.$$
(3.45)

Die Matrix Q_{ll} wird als Kofatormatrix bezeichnet. Durch sie werden Aussagen über die Relationen

der Genauigkeiten zwischen den einzelnen Beobachtungen dargestellt. Des Weiteren enthält sie Korrelationen, vergleiche hierzu auch Abschnitt 3.2.1. Es gilt

$$\boldsymbol{Q}_{ll} = \frac{1}{\sigma_0^2} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \dots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{21}\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \dots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}\sigma_n\sigma_1 & \rho_{n2}\sigma_n\sigma_2 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}.$$
(3.46)

Der Term σ_0^2 wird als a priori Varianzfaktor bezeichnet. Die Matrix **P** ist die Gewichtsmatrix und ergibt sich aus $\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1}$.

Vorab der Lösung, ist die Frage zu klären, ob es sich um eine Überbestimmung handelt. Dies ergibt sich aus der Anzahl der Freiheitsgrade, welche auch als Redundanz r bezeichnet werden. Diese ergibt sich im GHM aus

$$r = p - u. \tag{3.47}$$

Dabei ist p die Anzahl der Bedingungen und die der unbekannten Parameter u. Bei entsprechender Redundanz, kann die Lösung der Ausgleichungsaufgabe mit Hilfe des Schätzprinzip der Methode der kleinsten Quadrate (MkQ) erfolgen. Dann gilt die folgende Minimumsforderung:

$$\boldsymbol{v}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{v} \to \min.$$
 (3.48)

Der Vektor \boldsymbol{v} enthält die Verbesserungen. Unter der Berücksichtigung des linearisierten funktionalen Modells als Nebenbedingung (Ansatz nach Lagrange)

$$\Omega = \boldsymbol{v}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{v} - 2 \cdot \boldsymbol{k}^T (\boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{v} + \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{x} + \boldsymbol{w}) \to \min.$$
(3.49)

Der Vektor k ist der Korrelatenvektor. Die Lösung der Minimumsaufgabe erfolgt durch Differenzieren von Ω nach den Variablen v und x. Durch Umformung ergeben sich die Normalgleichungen

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{B}\boldsymbol{Q}_{ll}\boldsymbol{B}^T & \boldsymbol{A} \\ \boldsymbol{A}^T & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{k}} \\ \boldsymbol{\Delta}\hat{\boldsymbol{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{w} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix}.$$
(3.50)

Durch weiteres Umformen ergibt sich die Lösung

$$\begin{bmatrix} \hat{k} \\ \Delta \hat{x} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} BQ_{ll}B^T & A \\ A^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -w \\ 0 \end{bmatrix}.$$
(3.51)

Die Schätzwerte $\Delta \hat{x}$ stellen die Verbesserungen der Parameter im Ausgleichungsansatz dar. Die Schätzwerte der Parameter \hat{x} ergeben sich aus der Summe der Näherungswerte x_0 und den Schätzwerten für die Verbesserungen $\Delta \hat{x}$. Für die Berechnung der entsprechenden Größen sowie deren Kofaktormatrizen, gelten die folgenden Gleichungen:

$$\boldsymbol{w} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{l}_0, \boldsymbol{x}_0) + \boldsymbol{B} \cdot (\boldsymbol{l} - \boldsymbol{l}_0), \qquad \qquad \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{w}\boldsymbol{w}} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{Q}_{ll}\boldsymbol{B}^T \qquad (3.52)$$

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{x}_0 + \boldsymbol{\Delta}\hat{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{x}_0 + (\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{Q}_{ww}^{-1} \boldsymbol{A})^{-1} \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{Q}_{ww}^{-1}(-\boldsymbol{w}), \qquad \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x}} = (\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{Q}_{ww}^{-1} \boldsymbol{A})^{-1}$$
(3.53)
$$\hat{\boldsymbol{k}} = \boldsymbol{Q}^{-1} (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A} \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x}} \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{Q}^{-1}) \cdot (-\boldsymbol{w}) \qquad \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x}} = \boldsymbol{Q}^{-1} (\boldsymbol{Q}_{ww} - \boldsymbol{A} \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x}} \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{Q}^{-1})$$
(3.54)

$$\hat{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{Q}_{ll} \boldsymbol{B}^T \hat{\boldsymbol{k}}, \qquad \qquad \boldsymbol{Q}_{\hat{\imath}\hat{\imath}} = \boldsymbol{Q}_{ll} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{Q}_{\hat{\imath}\hat{\imath}} \boldsymbol{B} \boldsymbol{Q}_{ll} \qquad (3.55)$$

Die Lösung der Ausgleichung erfolgt iterativ bis zu einem festgelegten Abbruchkriterium. Abschließend ergeben sich die folgenden Rechenproben:

$$f(\hat{l}, \hat{x}) = 0$$
 ... Hauptprobe (3.57)

$$\boldsymbol{Q}_{ww} \cdot \boldsymbol{Q}_{\hat{k}\hat{k}} \cdot \boldsymbol{A} \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x}} \boldsymbol{A}^{T} \boldsymbol{Q}_{ww}^{-1} = \boldsymbol{0} \quad \dots \text{ Orthogonalitätsprobe}$$
(3.58)

Abschließend ergibt sich der a posteriori Varianzfaktor $\hat{\sigma}_0^2$ aus

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\boldsymbol{v}}^T \boldsymbol{P} \hat{\boldsymbol{v}}}{p-u} = \frac{\hat{\Omega}}{p-u}.$$
(3.59)

Ein Globaltest gibt Auskunft, ob die gewählten Annahmen im Rahmen der Ausgleichung korrekt sind. Im Falle von Problemen im funktionalen oder stochastischen Modell, sowie bei Ausreißern in den Beobachtungen führt dies zur Ablehnung der Testgröße

$$T = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \sim F_{p-u,\infty}.$$
 (3.60)

Abschließend kann die VKM berechnet werden, es gilt

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{x}\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x}}. \tag{3.61}$$

Auf der Hauptdiagonalen befinden sich die Varianzen der ausgeglichenen Parameter.

3.4 Räumliche Bestimmung der Form und Lage von Objekten

Im Rahmen dieser Arbeit wird als Objekt oder Körper im Folgenden der Begriff Geometrie verwendet. Später im Kapitel 4 (Systemkalibrierung) wird auch der Begriff Referenzgeometrie (RG) verwendet. Eine Geometrie ist eine Teilmenge von Punkten im 2D oder 3D Raum, durch welche ein Objekt bzw. ein Körper genau bestimmt wird. Die Erfassung der Geometrie erfolgt durch eine Messung von diskreten Punkten $(i = 1 \dots N)$, welche auf der Oberfläche durchgeführt werden. Als Fläche wird eine 2D Teilmenge des 3D Raumes, wie z.B. eine Ebene oder die äußere Begrenzung eines 3D Körpers verstanden. Dies bedeutet, dass eine Fläche sowohl flach als auch gekrümmt sein kann. Im Folgenden wird nun dargestellt, wie die Form und die Lage einer Geometrie bzw. deren Fläche bestimmt wird. Zum einen können diese 2D sein, wie z. B. Gerade, Ebene oder Kreis. Wobei hier anzumerken ist, dass diese Geometrien auch im 3D Raum definiert werden können. Weitere klassische 3D-Geometrien sind die Kugel, der Zylinder oder der Kegel. Generell sind zur eindeutigen Bestimmung einige Restriktionen zu beachten. Hierzu gehören eine Mindestanzahl von Punkten, welche eine entsprechende Anordnung haben. Im Falle einer Ebene sollte mindestens $N \ge 3$ Punkten verwendet werden, welche nicht auf einer Geraden liegen. Die Genauigkeit der Bestimmung ist dabei abhängig von der geometrischen Form, welche im Idealfall auch der jeweiligen Fläche des Körpers entspricht, sowie von der Genauigkeit mit welcher die Erfassung der Punkte erfolgte. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Standardformen behandelt. Hierzu zählen Hyperflächen zweiten Grades, wie z. B. Zylinder. Hierfür wird auch der Begriff Quadrik verwendet. Für die Bestimmung aus einer vorliegenden Punktmenge gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder ist die Form (z. B. Kugel) vorab bekannt und die Parameter müssen bestimmt werden. Zum anderen ist die Form nicht bekannt, hier besteht die Möglichkeit die Form mit Hilfe der bestanpassenden Quadrik (Minimierung der Verbesserungsquadratsumme der Beobachtungen) zu klassifizieren. Die optimale Bestimmung bzw. Einpassung der Fläche in die erfasste Punktwolke kann z. B. durch die in der Geodäsie bekannte MkQ erfolgen. Hieraus ergibt sich eine klassische Minimierungsaufgabe, welche als GHM gelöst werden kann, siehe Abschnitt 3.2. In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen des Ausgleichungsmodells bzw. die Parametrisierung und Klassifizierung der Quadriken vorgestellt. Die Darstellungen sind aus Drixler (1993) entnommen.

3.4.1 Ausgleichungsmodell

Allgemein ist eine Quadrik definiert als Menge aller Punkte $X \in \mathbb{R}^n$, welche die Gleichung

$$h(\boldsymbol{X}) = \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{B} \boldsymbol{X} + \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{b} + b_0 = \boldsymbol{0}$$
(3.62)

erfüllen. Im Folgenden wird nur auf den Hergang und die Berechnung der Quadriken im \mathbb{R}^3 eingegangen. Räumlich beschreibt die Quadrik eine Fläche zweiten Grades, wie z. B. Ebene und Zylinder. Der Ausgleichungsansatz kann durch ein GHM mit Restriktionen formuliert werden. Das funktionale Modell besteht hierbei aus einem System von Bedingungsgleichungen, welche durch die Gleichung 3.62 gegeben sind. Hieraus ergibt sich, dass jeder Punkt die Bedingungsgleichung

$$F(\hat{\boldsymbol{a}}, \boldsymbol{X} + \boldsymbol{v})_i = (\boldsymbol{X} + \boldsymbol{v})_i^T \boldsymbol{B} (\boldsymbol{X} + \boldsymbol{v})_i + (\boldsymbol{X} + \boldsymbol{v})_i^T \boldsymbol{b} + b_0 = 0$$
(3.63)

erfüllt. Die unbekannten Koeffizienten \hat{a}_i , welche die Quadrik bestimmen, sind in der symmetrischen Matrix **B**, dem Vektor **b** und dem Skalar b_0 zusammengefasst. Es gilt

$$\boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} \hat{a}_1 & \hat{a}_4/\sqrt{2} & \hat{a}_5/\sqrt{2} \\ \hat{a}_4/\sqrt{2} & \hat{a}_2 & \hat{a}_6/\sqrt{2} \\ \hat{a}_5/\sqrt{2} & \hat{a}_6/\sqrt{2} & \hat{a}_3 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{b} = \begin{pmatrix} \hat{a}_7 \\ \hat{a}_8 \\ \hat{a}_9 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad b_0 = \hat{a}_{10}.$$
(3.64)

Die Vektoren X_i und v_i beinhalten die Punktkoordinaten und deren Verbesserungen. Es gilt

$$\boldsymbol{X}_{i} = \begin{pmatrix} x_{i} \\ y_{i} \\ z_{i} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \boldsymbol{v}_{i} = \begin{pmatrix} v_{x_{i}} \\ v_{y_{i}} \\ v_{z_{i}} \end{pmatrix}.$$
(3.65)

Das stochastische Modell der Beobachtungen ergibt sich aus

$$\boldsymbol{\Sigma}_{ll} = \sigma^2 \boldsymbol{Q}_{ll} = \sigma^2 \boldsymbol{P}_{ll}^{-1}.$$
(3.66)

Zur Sicherung der Konvergenz beim iterativen Vorgehen zur Lösung des GHM sind hinreichend genaue Näherungswerte nötig. Liegen diese nicht vor bzw. sind nur aufwändig zu bestimmen, wird das GHM in ein äquivalentes Gauß-Markov-Modell (GMM) überführt. Zur Schätzung der unbekannten Koeffizienten der Quadrik, wird die Gleichung 3.63 durch die folgende Restriktion erweitert

$$Spur\left(\boldsymbol{B}^{T}\boldsymbol{B}\right) = \sum_{i=1}^{6} \hat{a}_{i}^{2} = 1.$$
(3.67)

Dies entspricht einer invarianten Koordinatentransformation, was bedeutet, dass die Schätzung der Quadrik unabhänig vom Koordinatensystem erfolgt. Die Unbekannten werden in zwei unterscheidliche Gruppen eingeteilt. Es ergibt sich das folgende resultierende Gleichungssystem

$$v_w = -A_1 \hat{s}_1 - A_2 \hat{s}_2$$
 (3.68)

$$\hat{s}_{1}^{T}\hat{s}_{1} = 1 \tag{3.69}$$

mit:

$$\boldsymbol{A}_{1} = \begin{pmatrix} x_{1}^{2} & y_{1}^{2} & z_{1}^{2} & \sqrt{2}x_{1}y_{1} & \sqrt{2}x_{1}z_{1} & \sqrt{2}y_{1}z_{1} \\ x_{2}^{2} & y_{2}^{2} & z_{2}^{2} & \sqrt{2}x_{2}y_{2} & \sqrt{2}x_{2}z_{2} & \sqrt{2}y_{2}z_{2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N}^{2} & y_{N}^{2} & z_{N}^{2} & \sqrt{2}x_{N}y_{N} & \sqrt{2}x_{N}z_{N} & \sqrt{2}y_{N}z_{N} \end{pmatrix},$$
(3.70)

$$\mathbf{A}_{2} = \begin{pmatrix} x_{1} & y_{1} & z_{1} & 1 \\ x_{2} & y_{2} & z_{2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N} & y_{N} & z_{N} & 1 \end{pmatrix},$$
(3.71)

$$\hat{s}_1 = (\hat{a}_1 \ \hat{a}_2 \ \hat{a}_3 \ \hat{a}_4 \ \hat{a}_5 \ \hat{a}_6)^T$$
und (3.72)

$$\hat{s}_2 = (\hat{a}_7 \quad \hat{a}_8 \quad \hat{a}_9 \quad \hat{a}_{10})^T.$$
(3.73)

Das dazugehörige stochastische Modell ist

$$\boldsymbol{P}_{ww} = \left(\boldsymbol{U}\boldsymbol{Q}_{ll}\boldsymbol{U}^{T}\right)^{-1}.$$
(3.74)

Hierbei ist Q_{ll} die Kofaktormatrix der beobachteten Punkte. Die Matrix U ergibt sich aus

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \gamma_1 & \delta_1 & \epsilon_1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_2 & \delta_2 & \epsilon_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \gamma_N & \delta_N & \epsilon_N \end{bmatrix}$$
(3.75)

mit:

$$\gamma_i = 2a_1 x_i + \sqrt{2}a_4 y_i + \sqrt{2}a_5 z_i + a_7, \tag{3.76}$$

$$\delta_i = 2a_2y_i + \sqrt{2}a_4x_i + \sqrt{2}a_6z_i + a_8 \quad \text{und} \tag{3.77}$$

$$\epsilon_i = 2a_3 z_i + \sqrt{2}a_5 x_i + \sqrt{2}a_6 y_i + a_9. \tag{3.78}$$

Durch Darstellung von \hat{s}_2 mit Hilfe von \hat{s}_1 werden diese eliminiert, es gilt

$$\mathbf{\hat{s}}_2 = -\left(\mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_{ww} \mathbf{A}_2\right)^{-1} \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_{ww} \mathbf{A}_1 \mathbf{\hat{s}}_1.$$
(3.79)

Die verbleibenden Unbekannten in $\hat{\mathbf{s}}_1$ werden durch die spektrale Zerlegung des Matrizenproduktes $(\mathbf{A}_1^T \mathbf{H} \mathbf{A}_1)$ bestimmt. Dazu wird die reduzierte Gleichgewichtsmatrix

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{P}_{ww} - \boldsymbol{P}_{ww} \boldsymbol{A}_2 \left(\boldsymbol{A}_2^T \boldsymbol{P}_{ww} \boldsymbol{A}_2 \right)^{-1} \boldsymbol{A}_2^T \boldsymbol{P}_{ww}$$
(3.80)

benötigt. Der zum kleinsten Eigenwert λ_{min} gehörende Eigenvektor enthält die gesuchten Koeffizienten \hat{s}_1 . Somit liegen so die Koeffizienten der Quadrik vor und können anschließend entsprechend ihrer Form klassifiziert werden.

3.4.2 Klassifizierung

Zur Klassifizierung wird die Quadrik in eine Normalform überführt. Dieser Vorgang wird als Hauptachsentransformation bezeichnet. Quadriken unterscheiden sich in Abhängigkeit der Determinante der Koeffizientenmatrix \boldsymbol{B} in verschiedene Kategorien. Ist die Determinante von Null verschieden, ist \boldsymbol{B} regulär, so wird dies als Mittelpunktquadrik bezeichnet. Deren Normalform entspricht

$$\lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2 + d_O = 0.$$
(3.81)

Geometrisch entspricht dies einer Parallelverschiebung des Koordinaten
ursprunges O der Quadrik in ihren Mittelpunkt p und einer anschließenden Drehung der Koordinaten
achsen. Nach Berechnung

des Mittelpunktes über

$$\boldsymbol{p} = -\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{b} \tag{3.82}$$

kann die skalare Größe d aus der Beziehung

$$d = \boldsymbol{b}^T \boldsymbol{p} + \boldsymbol{b}_0 \tag{3.83}$$

abgeleitet werden. Die spektrale Zerlegung der Matrix \boldsymbol{B}

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{M}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{M}^T \tag{3.84}$$

unterteilt in die Dispersionsmatrix Λ , welche die Eigenwerte λ_i liefert und die Modalmatrix M, welche die normierten Eigenvektoren ξ_i liefert. Diese stellen die Basis des neuen Koordiantensystems dar. Für den Fall, dass B singulär ist und keine Symmetrieeigenschaften besteht, wird die Quadrik durch Hauptachsentransformation auf die Normalform

$$\lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_{n-1} \xi_{n-1}^2 + 2m \xi_n = 0.$$
(3.85)

gebracht. Liegen die Quadriken nach den Gleichungen 3.81 und 3.85 vor, so kann die Quadrik in Abhängigkeit von λ_i , m und d klassifiziert werden. Im Folgenden werden Flächen zweiten Grades und die Ebene dargestellt.

3.4.3 Ausgleichende Ebene

Für die normgerechte Berechnung einer Ebene, werden die lotrechten Abstände der gemessenen Punkte herangezogen. Als Darstellung wird die Hesse'sche Normalform gewählt. Diese geht aus einer Quadrik mit verschwindender Koeffizientenmatrix \boldsymbol{B} hervor. Es gilt

$$a_7 x + a_8 y + a_9 z + a_{10} = 0. ag{3.86}$$

Die Normalform wird erhalten, wenn die Koeffizienten durch die Norm des Vektors $\mathbf{n} = (a_7, a_8, a_9)^T$ dividiert wird. Daraus ergibt sich

$$x n_x + y n_y + z n_z - d_O = 0$$
, mit der Bedingung $|\mathbf{n}| = \mathbf{n}^T \mathbf{n} = 1.$ (3.87)

Dabei ist n der Normalenvektor, d_O der kürzeste Abstand vom Koordinatenursprung O und (x, y, z) sind die Koordinaten der gemessenen Punkte. Die Verbesserungsgleichung ergibt sich aus

$$v_i = -n_x \ x_i - n_y \ y_i - n_z \ z_i - d_O. \tag{3.88}$$

Durch Transformation der N gemessenen Koordinaten in die Schwerpunkt-bezogenen Koordinaten, wird der Abstandsparameter d eliminiert, vergleiche Gleichungen 3.82 und 3.83. Es gilt

$$x'_{i} = x_{i} - \frac{\sum x_{i}}{N}, \quad y'_{i} = y_{i} - \frac{\sum y_{i}}{N} \quad \text{und} \quad z'_{i} = z_{i} - \frac{\sum z_{i}}{N}.$$
 (3.89)

Die Schwerpunkt-bezogenen Koordinaten werden in der Designmatrix A' zusammengefasst. Es gilt

$$\boldsymbol{A}' = \begin{bmatrix} x_1' & y_1' & z_1' \\ x_2' & y_2' & z_2' \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N' & y_N' & z_N' \end{bmatrix}.$$
(3.90)

Durch spektrale Zerlegung, vergleiche Gleichung 3.84, welche durch

$$\mathbf{A'}^{T}\mathbf{A}' = \mathbf{M}\mathbf{\Lambda}\mathbf{M}^{T}$$
(3.91)

erfolgt, ergeben sich die Ebenenparameter. Zur Vereinfachung wird von gleichgewichteten und unkorrelierten Koordinaten ausgegangen. Damit und mit der in der Gleichung 3.87 formulierten Bedingung, wird als stochastisches Modell, vergleiche Gleichung 3.74 die Einheitsmatrix verwendet. Die Matrix Λ enthält die Eigenwerte. Der kleinste Eigenwert λ_{min} entspricht der Quadratsumme der lotrechten Abstände zwischen Ebene und gemessenen Punkten. Die Matrix M enthält dabei die Eigenvektoren $\boldsymbol{\xi}_i$. Der zu λ_{min} gehörende Eigenvektor $\boldsymbol{\xi}_{min}$ repräsentiert den Normalenvektor $\boldsymbol{n} = [n_x \ n_y \ n_z]$ der Ebene. Der eliminierte Abstandsparameter d ergibt sich aus

$$d = (\boldsymbol{e}^T \boldsymbol{e})^{-1} \boldsymbol{e}^T \boldsymbol{A} \ \boldsymbol{n} = \frac{1}{N} \left[\sum (x_i \ n_x) + \sum (y_i \ n_y) \sum (z_i \ n_z) \right]$$
(3.92)

Die Genauigkeiten der Parameter ergeben sich aus dem Varianzfaktor

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{v}^T \boldsymbol{v}}{(N-3)}} = \sqrt{\frac{\lambda_{min}}{(N-3)}},\tag{3.93}$$

den Elementen der Kofaktormatrix Q_{nn} sowie dem Kofaktor des Abstandsparameters $q_{d_O d_O}$

$$\boldsymbol{Q}_{nn} = \frac{1}{\lambda_2} n_2 \ n_2^T + \frac{1}{\lambda_3} n_3 \ n_3^T = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad q_{d_O d_O} = \frac{1}{N^2} \boldsymbol{e}^T \boldsymbol{A} \boldsymbol{Q}_{nn} \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{e} \quad (3.94)$$

zu $\hat{\sigma}_{n_x} = \hat{\sigma}\sqrt{q_{11}}, \ \hat{\sigma}_{n_y} = \hat{\sigma}\sqrt{q_{22}}, \ \hat{\sigma}_{n_z} = \hat{\sigma}\sqrt{q_{33}} \text{ und } \hat{\sigma}_{d_O} = \hat{\sigma}\sqrt{q_{d_Od_O}}.$

3.4.4 Flächen zweiten Grades

Eine Punktmenge, welche die Gleichung 3.62 erfüllt, wird als Fläche zweiten Grades bezeichnet. Diese Gleichung lautet ausführlich

$$a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 z^2 + \sqrt{2}a_4 xy + \sqrt{2}a_5 xz + \sqrt{2}a_6 yz + a_7 x + a_8 y + a_9 z + a_{10} = 0.$$
(3.95)

Mit Hilfe der Hauptachstentransformation erfolgt die Umwandlung auf die Normalform

$$\lambda_1 x^2 + \lambda_2 y^2 + \lambda_3 z^2 + d_O = 0$$
(3.96)

$$\lambda_1 x^2 + \lambda_2 y^2 + 2mz = 0.$$
(3.97)

Zur Klassifizierung werden Koeffizienten λ_i, m und d_O verwendet. Eine Übersicht der 3D-Quadriken ist in der Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Klassifikation der Flächen zweiten Grades (3D-Quadriken) nach den Parametern λ_i , m bzw. d, Tabelle aus Drixler (1993, S. 33)

Name der Fläche	λ_1	λ_2	λ_3	d	m	Gleichung
Ellipsoid	> 0	> 0	> 0	< 0	—	$x^2/a^2 + y^2/b^2 + z^2/c^2 = 1$
Hyperboloid	> 0	> 0	< 0	< 0	_	$x^2/a^2 + y^2/b^2 - z^2/c^2 = 1$
Kegel	> 0	> 0	< 0	= 0	_	$x^2/a^2 + y^2/b^2 - z^2/c^2 = 0$
Paraboloid	> 0	> 0	_	_	< 0	$x^2/a^2 + y^2/b^2 = z$
Ellipt. Zylinder	> 0	> 0	= 0	< 0	_	$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$
Parabol. Zylinder	> 0	= 0	_	_	$\neq 0$	$x^2 = \alpha y (\alpha \neq 0)$

3.5 Filterung

Das Ziel der Filterung ist die optimale Kombination der zur Verfügung stehenden Informationen. Dabei können zum einen physikalisch abhängige Größen aus den Beobachtungen ermittelt werden. Des Weiteren können die Daten mehrerer Sensoren, welche unterschiedliche Beobachtungsgrößen liefern, kombiniert werden. Auch eine Kombination von redundanten Daten, also von Sensoren, welche die gleichen Größen beobachten, ist hiermit möglich. Dies kann dazu führen das die Zuverlässigkeit der Lösung und die Qualität der Daten gesteigert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird das KF bzw. seine geläufigen Erweiterungen gewählt. Daher beschränken sich die hier dargestellten mathematischen Grundlagen auf diese Thematik. Für eine detailliertere Darstellung wird auf Simon (2006) verwiesen.

3.5.1 Das Kalmanfilter

Das in Kalman (1960) vorgestellte Prinzip des KF gilt als optimaler Schätzer für einen linearen Zusammenhang. Es kommt daher häufig bei linearen dynamischen Systemen zur Anwendung. Neben dem geschätzten momentanen Zustand, welcher durch den Zustandsvektor \hat{x} ausgedrückt wird, wird dabei auch dessen Präzision in Form einer VKM $Q_{\hat{x}\hat{x}}$ berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Zustände normalverteilt sind. Das KF durchläuft ein iteratives Schema, welches den Zustand (k) eines Systems auf Grundlage der aktuellen Beobachtungen, von vorher getroffen Annahmen und des vorherigen Zustandes (k-1) berechnet. Das Ziel ist dabei $\hat{x}^{(k)}$ im Bezug auf die Kenntnis der Systemdynamik und der Verfügbarkeit der verrauschten Beobachtungen $l^{(k)}$ zu schätzen. Liegen alle Beobachtungen bis zur Epoche (k), d. h. bis zur Schätzung des Zustandsvektors, vor, wird dies als *a posteriori* Schätzung bezeichnet. Es gilt

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{+}^{(k)} = E\left[\boldsymbol{x}^{(k)} | \boldsymbol{l}^{(1)}, \boldsymbol{l}^{(2)}, \dots, \boldsymbol{l}^{(k)}\right].$$
(3.98)

Werden für die Schätzung des aktuellen Zustandes alle Beobachtungen außer den aktuellen verwendet, so wird dies als *a priori* Schätzung bezeichnet, es gilt

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} = E\left[\boldsymbol{x}^{(k)}|\boldsymbol{l}^{(1)}, \boldsymbol{l}^{(2)}, \dots, \boldsymbol{l}^{(k-1)}\right].$$
(3.99)

In der Abbildung 3.5 ist eine grafische Erläuterung der zeitlichen Einordnung der a priori und a posteriori Zustandsschätzung und VKM.



Abbildung 3.5: Darstellung der zeitlichen Einordnung der a priori und a posteriori Zustandsschätzung und der dazugehörigen VKM.

Hierbei ist anzumerken, dass beide Schätzungen $\hat{x}_{+}^{(k)}$ und $\hat{x}_{-}^{(k)}$ für den gleichen unbekannten Zustandsvektor $x^{(k)}$ gelten. Im Rahmen der *Prädiktion* wird mithilfe der Systemgleichung der aufdatierte Zustand des vorangegangen Zeitschrittes $\hat{x}_{+}^{(k-1)}$ in den Zustand des aktuellen Zeitpunkts $\hat{x}_{-}^{(k)}$

überführt, welcher auch als prädizierter Zustand bezeichnet wird. Dies erfolgt in Abhängigkeit eines definierten Zeitschrittes. Die Systemgleichung beschreibt dabei den physikalischen Zusammenhang, welcher zwischen den beiden Zuständen herrscht. Optional besteht die Möglichkeit Steuerungsbefehle, welche im Vektor $\boldsymbol{u}^{(k-1)}$ zusammengefasst sind, mit in den Zusammenhang einfließen zu lassen. Des Weiteren wird der Term $\boldsymbol{w}^{(k-1)}$ eingeführt, welcher als Systemstörung bezeichnet wird. Es gilt

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} = f\left(\hat{\boldsymbol{x}}_{+}^{(k-1)}, \boldsymbol{u}^{(k-1)}, \boldsymbol{w}^{(k-1)}\right).$$
(3.100)

Im Falle eines linearen Zusammenhanges kann dies auch, wie in der Gleichung 3.101 dargestellt, diskretisiert werden. Die Matrix $\mathbf{\Phi}^{(k-1)}$ wird als Transitionsmatrix bezeichnet. Sie beschriebt den Übergang zwischen den einzelnen Zustände, welcher in den definierten Zeitschritten erfolgt. Die Matrix $\mathbf{L}^{(k-1)}$ wird als Stellmatrix bezeichnet. Es gilt

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} = \boldsymbol{\Phi}^{(k-1)} \, \hat{\boldsymbol{x}}_{+}^{(k-1)} + \boldsymbol{L}^{(k-1)} \, \boldsymbol{u}^{(k-1)} + \, \boldsymbol{w}^{(k-1)}.$$
(3.101)

Auch die Genauigkeiten in Form der VKM $Q_{\hat{x}\hat{x},+}^{(k-1)}$ wird mithilfe von $\Phi^{(k-1)}$ in das nächste Zeitintervall (k) übertragen. Um Abweichungen, welche aus einem unvollständigen physikalischen Modell resultieren, wird das Systemrauschen in Form der VKM $Q_{ww}^{(k-1)}$ eingeführt. Hierfür gilt die Annahme, dass dieses der Normalverteilung $w^{(k-1)} \sim N(\mathbf{0}, Q_{ww}^{(k-1)})$ entspricht. Es gilt entsprechend

$$\boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)} = \boldsymbol{\Phi}^{(k-1)} \; \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},+}^{(k-1)} \; \boldsymbol{\Phi}^{(k-1)^{T}} + \; \boldsymbol{Q}_{ww}^{(k-1)}.$$
(3.102)

Hierdurch ist es zusätzlich möglich, die Einflüsse der Umgebung, welcher zum Zeitpunkt des Übergang bestehen, mit zu berücksichtigen.

Im Anschluss erfolgt als zweiter Schritt die *Filterung*. Hierbei wird eine Aufdatierung (Update) der Beobachtungen durchgeführt. Voraussetzung für die Schätzung von $\hat{x}_{+}^{(k)}$ ist, dass die Größen $l^{(k)}$ (beinhaltet die aktuellen Beobachtungen) und $\hat{x}_{-}^{(k)}$ (Zustandsvektor) verfügbar sind. Wie bereits erwähnt, sind beide $\hat{x}_{+}^{(k)}$ und $\hat{x}_{-}^{(k)}$ Schätzwerte für den gleichen unbekannten Zustandsvektor. Der Unterschied zwischen beiden liegt darin, dass für $\hat{x}_{+}^{(k)}$ die aktuellen Beobachtungen $l^{(k)}$ verwendet werden sollen. Hierfür wird der lineare Schätzer verwendet, es gilt

$$\boldsymbol{l}^{(k)} = \boldsymbol{A}^{(k)} \ \hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} + \boldsymbol{v}^{(k)} \quad \text{und}$$
(3.103)

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{+}^{(k)} = \hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} + \boldsymbol{K}^{(k)} \left(\boldsymbol{l}^{(k)} - \boldsymbol{A}^{(k)} \hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} \right).$$
(3.104)

Hierbei wird die Matrix $\mathbf{A}^{(k)}$ als Designmatrix und der Term $(\mathbf{l}^{(k)} - \mathbf{A}^{(k)} \hat{\mathbf{x}}_{-}^{(k)})$ als Innovation bezeichnet. Letztere beschreibt die Abweichung zwischen den in den Beobachtungsraum überführten prädizierten Zustand $(\mathbf{A}^{(k)} \hat{\mathbf{x}}_{-}^{(k)})$ und den Beobachtungen $\mathbf{l}^{(k)}$. Wie stark der Einfluss der Beobachtungen ist, regelt die Kalman-Gain-Matrix (KGM) $\mathbf{K}^{(K)}$. Diese beschreibt das Verhältnis zwischen den Genauigkeiten des prädizierten Zustandes und den der Beobachtungen. In beiden Fällen wird eine VKM verwendet. Für den prädizierten Zustand ist dies $\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}_{,-}}^{(k)}$ und für die Beobachtungen $\mathbf{Q}_{ll}^{(k)}$. Letzteres wird auch als Beobachtungsrauschen bezeichnet. Auch hierfür gilt die Annahme, dass dieses der Normalverteilung $\mathbf{v}^{(k)} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_{ll}^{(k)})$ entspricht. Die KGM $\mathbf{K}^{(K)}$ ergibt sich aus

$$\boldsymbol{K}^{(k)} = \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)} \boldsymbol{A}^{(k)^{T}} \left(\boldsymbol{Q}_{ll}^{(k)} + \boldsymbol{A}^{(k)} \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)} \boldsymbol{A}^{(k)^{T}} \right)^{-1}.$$
(3.105)

Dabei ist $\mathbf{K}^{(k)}$ von den Genauigkeiten der Beobachtungen (\mathbf{Q}_{ll}) bzw. von denen des prädizierten Zustands $(\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)})$ abhängig. Im Falle von höheren Genauigkeiten bei den Beobachtungen, vergrößert
sich $\mathbf{K}^{(k)}$. Sind die Genauigkeiten des prädizierten Zustandes schlechter, verringert sich $\mathbf{K}^{(k)}$. Somit wird die Innovation $\left(\mathbf{l}^{(k)} - \mathbf{A}^{(k)} \hat{\mathbf{x}}_{-}^{(k)} \right)$ durch $\mathbf{K}^{(k)}$ gewichtet. Abschließend wird die Kovaktormatrix $\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x},+}^{(k)}$ aufdatiert, es gilt

$$\boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},+}^{(k)} = \left(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}^{(k)}\boldsymbol{A}^{(k)}\right)\boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)}.$$
(3.106)

Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass bei der Prozessierung aufgrund von Rundungsfehlern die Symmetrie verloren gehen kann. Um dies zu vermeiden kann die *Joseph Form* verwendet werden. Hierdurch wird eine symmetrische Form erreicht. Für weitere Details wird auf Bucy und Joseph (1968) verwiesen.

Da sich immer nur zwei Epochen in der Verarbeitung befinden, ist das KF ein onlinefähiger Filter. Neben der Geodäsie, finden KF häufig in der Robotik Anwendung.

3.5.2 Das Extended Kalmanfilter

Das EKF stellt eine Erweiterung des klassischen KF dar. Hierbei wird dem Problem entgegengewirkt, dass das KF nur auf lineare Systeme angewendet werden kann. Beim EKF wird eine Linearisierung durchgeführt. Im Unterschied zum KF ist das EKF zwar kein optimaler Schätzer, kann aber nicht lineare Zusammenhänge verarbeiten. Zur Anwendung kommt diese Methode, wenn die Update-Gleichung der Beobachtungen (Gleichung 3.103) und die des Zustandes (Gleichungen 3.104 bzw. 3.106) nicht linear sind.

Der Ablauf beim EKF entspricht weitestgehend dem des KF. Auch hier erfolgt als erster Schritt die Prädiktion. Im Falle einer nicht linearen Systemgleichung, vergleiche Gleichung 3.100, wird diese über eine Taylor-Reihe Entwicklung um den Entwicklungspunkt $\hat{x}_{+}^{(k-1)}$ linearisiert. Es gilt

$$\boldsymbol{\Phi}^{(k-1)} = \frac{\partial \boldsymbol{f}_{(k-1)}}{\partial \hat{\boldsymbol{x}}} \Big|_{\hat{\boldsymbol{x}}_{+}^{(k-1)}}.$$
(3.107)

Im Falle eines nicht linearen Zusammenhang zwischen dem Systemrauschen w und dem Zustandsvektor wird ebenfalls die Stellmatrix $G^{(k-1)}$ linearisiert, es gilt

$$\boldsymbol{G}^{(k-1)} = \frac{\partial \boldsymbol{f}_{(k-1)}}{\partial \boldsymbol{w}} \Big|_{\boldsymbol{\hat{x}}_{+}^{(k-1)}}.$$
(3.108)

Anschließend erfolgt die Prädiktion des Zustandes, siehe Gleichung 3.109 bzw. die Aufdatierung der VKM, siehe Gleichung 3.110. Es gilt

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} = \boldsymbol{f}_{(k-1)} \left(\hat{\boldsymbol{x}}_{+}^{(k-1)}, \boldsymbol{u}^{(k-1)}, \boldsymbol{w}^{(k-1)} \right) \quad \text{und}$$
(3.109)

$$\boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)} = \boldsymbol{\Phi}^{(k-1)} \; \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},+}^{(k-1)} \; \boldsymbol{\Phi}^{(k-1)^{T}} + \boldsymbol{G}^{(k-1)} \; \boldsymbol{Q}_{ww}^{(k-1)} \; \boldsymbol{G}^{(k-1)^{T}}$$
(3.110)

Der Zusammenhang zwischen Beobachtungs- und Zustandsraum ergibt sich aus

$$\boldsymbol{l}^{(k)} = \boldsymbol{h}_{(k)} \left(\boldsymbol{x}^{(k)}, \boldsymbol{v}^{(k)} \right).$$
(3.111)

Beim Aufstellen der Designmatrix **A** muss gegebenenfalls an der Stelle $\hat{x}_{-}^{(k)}$ linearisiert werden. Es gilt

$$\boldsymbol{A}^{(k)} = \frac{\partial \boldsymbol{h}_{(k)}}{\partial \boldsymbol{x}} \Big|_{\boldsymbol{\hat{x}}_{-}^{(k)}}.$$
(3.112)

Der Filterungsschritt ergibt sich somit aus den folgenden Gleichungen

$$\boldsymbol{K}^{(k)} = \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)} \boldsymbol{A}^{(k)^{T}} \left(\boldsymbol{A}^{(k)} \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)} \boldsymbol{A}^{(k)^{T}} + \boldsymbol{Q}_{ll}^{(k)} \right)^{-1}, \qquad (3.113)$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{+}^{(k)} = \hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} + \boldsymbol{K}^{(k)} \left[\boldsymbol{l}^{(k)} - \boldsymbol{h}_{(k)} \left(\hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} \right) \right] \quad \text{und}$$
(3.114)

$$\boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},+}^{(k)} = \left(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}^{(k)} \ \boldsymbol{A}^{(k)}\right) \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)} .$$
(3.115)

3.5.3 Das iterative Extended Kalmanfilter

Beim iEKF wird das EKF noch einmal erweitert. Im Falle von stark nicht linearen Zusammenhängen kann es zu größeren Abweichungen bei der Linearisierung kommen. Um dem entgegenzuwirken, wird die Filterung in sich iterativ behandelt, vergleiche Gleichungen 3.116 - 3.119. Der Index i stellt dabei die Anzahl der Iterationen dar. Als Abbruchbedingung kann dabei die Änderung des Zustandsvektor zwischen den Epochen herangezogen werden. Für die Filterung gilt

$$\boldsymbol{A}_{i}^{(k)} = \frac{\partial \boldsymbol{h}_{(k)}}{\partial \boldsymbol{x}}\Big|_{\hat{\boldsymbol{x}}_{i,+}^{(k)}}, \qquad (3.116)$$

$$\boldsymbol{K}_{i}^{(k)} = \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)} \boldsymbol{A}_{i}^{(k)T} \left(\boldsymbol{A}_{i}^{(k)} \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)} \boldsymbol{A}_{i}^{(k)T} + \boldsymbol{Q}_{ll}^{k} \right)^{-1}, \qquad (3.117)$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{i+1,+}^{(k)} = \hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} + \boldsymbol{K}_{i}^{(k)} \left[\boldsymbol{l}^{(k)} - \boldsymbol{h}_{(k)} \left(\hat{\boldsymbol{x}}_{i,+}^{(k)} \right) - \boldsymbol{A}_{i}^{(k)} \left(\hat{\boldsymbol{x}}_{-}^{(k)} - \hat{\boldsymbol{x}}_{i,+}^{(k)} \right) \right] \quad \text{und}$$
(3.118)

$$\boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},i+1,+}^{(k)} = \left(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_{i}^{(k)} \; \boldsymbol{A}_{i}^{(k)}\right) \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)}.$$
(3.119)

Dabei entspricht in der ersten Iteration $\hat{x}_{i,+}^{(k)} = \hat{x}_{-}^{(k)}$. Ist die Abbruchbedingung erfüllt, ergibt sich

$$\hat{x}_{+}^{(k)} = \hat{x}_{i+1,+}^{(k)}$$
 und (3.120)

$$\boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},+}^{(k)} = \boldsymbol{Q}_{\hat{x}\hat{x},+1,+}^{(k)}$$
(3.121)
(3.121)

4 Systemkalibrierung

Bei der 3D-Objekterfassung mit einem k-TLS-basierten MSS werden wie in Abschnitt 2.7 beschrieben mehrere Sensoren verwendet. Da jeder der Sensoren im Regelfall sein eigenes internes Koordinatensystem besitzt, sind die Daten für eine gemeinsame Prozessierung in ein einheitliches Koordinatensystem zu überführen. Dafür sind die Transformationsparameter zwischen den unterschiedlichen Sensorkoordinatensystemen zu bestimmen. Bei der Verwendung von mehreren Sensoren in einem MSS, bietet sich die Definition eines einheitlichen Plattformkoordinatensystems an. Festzulegen sind der Ursprung und die Koordinatenachsen. Die Realisierung kann auf unterschiedlichste Art und Weise erfolgen, z. B. unter Ausnutzung von Bohrungen, Außenflächen der Sensoren oder durch Anbringen von Halterungen für Reflektoren. Darüber hinaus ist es möglich, eines der lokalen Sensorkoordinatensysteme gleichzeitig als Plattformkoordinatensystem zu definieren. Ein Beispiel ist das Koordinatensystem des georeferenzierenden Sensors. In diesem Falle wird einer der Transformationsschritte eingespart. Da für den Begriff Plattformkoordinatensystem im Englischen die Bezeichnung Body-Frame verwendet wird, wird dies hier mit b gekennzeichnet.

Der Übergang zwischen zwei 3D-Koordinatensystemen wird als räumliche Ahnlichkeitstransformation bezeichnet und durch die Gleichung 3.1 beschrieben. Im Falle des hier verwendeten k-TLSbasierten MSS, vergleiche Abschnitt Abschnitt 2.7.4, wird als erfassender Sensor ein Laserscanner verwendet. Die Daten werden anschließend in einem ersten Transformationsschritt vom Koordinatensystem des Laserscanners s in den Body-Frame b, welcher hier durch eine T-Probe realisiert wird, überführt. Der funktionale Zusammenhang ist in der Gleichung 2.2 gegeben. Als Transformationsparameter (6 DoF) sind hier je drei Translationen $(t_X, t_Y, t_Z)|_s^b$ und Rotationen $(\kappa, \varphi, \omega)|_s^b$ zu bestimmen. Der Maßstabsfaktor wird hier m = 1 gesetzt, da von einer festen und konstanten Sensorkonstellation ausgegangen wird. Der Vorgang die entsprechenden Parameter zu bestimmen, wird als Systemkalibrierung bezeichnet. Im Falle des im Abschnitt 2.7 vorgestellten k-TLS-basierten MSS ist eine direkte Bestimmung der 6 DoF nicht möglich. Der Abgriff der Werte kann nur näherungsweise erfolgen. Daraus ergibt sich die Vorgabe ein Verfahren zu verwenden, durch welches die Bestimmung der 6 DoF ohne einen Abgriff ermöglicht wird. Des Weiteren sind die sehr hohen Genauigkeitsvorgaben, aus Abschnitt 2.6.3 zu erreichen. Daher kommt in dieser Arbeit für die Systemkalibrierung das auf RG basierende Verfahren nach Strübing und Neumann (2013) zur Anwendung.

An dieser Stelle sei nochmals auf die Sensor-interne Kalibrierung beim Laserscanner, vergleiche Abschnitt 2.4.2, hingewiesen. Diese Parameter sind entsprechend zu bestimmen und bei der Prozessierung der Daten mit zu berücksichtigen. In dieser Arbeit wird angenommen, dass die Parameter durch den Hersteller intern vorab bestimmt wurden und somit bei der internen Prozessierung mit berücksichtigt werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit das funktionale Modell bei der Systemkalibrierung entsprechend zu erweitern. Hierdurch ist es möglich das einige der Parameter mitgeschätzt werden. Ein Beispiel stellt z. B. die Bestimmung der Additionskonstante bei der Distanzmessung des Laserscanners dar. Hierfür sei auf die Arbeiten von Heinz u. a. (2017) und Ernst u. a. (2022) verwiesen.

Der Aufbau des Kapitels gliedert sich wie folgt. Am Beginn wird der aktuelle Stand der Forschung und Entwicklung bei Thema Systemkalibrierung für k-TLS-basierte MSS zusammengefasst. Zunächst erfolgt eine generelle Darstellung aller wesentlichen Schritte für die Bestimmung der 6 DoF. Diese werden durch eine Ausgleichung im Rahmen eines GHM geschätzt. Da die Anordnung der RG von entscheidender Bedeutung bei der Bestimmung der 6 DoF ist, wird der Fokus auf deren Anordnung gelegt, siehe Abschnitt 4.2. Nach Erläuterung einiger theoretischer Aspekte, wird die Optimierung der RG dargestellt. Anschließend wird im Abschnitt 4.4 eine Umsetzung einer festen Kalibrierumgebung präsentiert. Hierfür werden RE, welche über Drehgelenke einstellbar sind, verwendet. Im Abschnitt 4.4.3 werden exemplarisch die Ergebnisse für eine Systemkalibrierung mit einem Z+F IMAGER 5010 und 5016 zu einer T-Probe vorgestellt. Abschließend erfolgt die Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der erreichten Genauigkeiten und Vorgaben.

4.1 Strategien und Ansätze

In diesem Abschnitt erfolgt eine Darstellung der Ansätze, mit welchen eine Systemkalibrierung durchgeführt werden kann. Eine einfache und schnelle Möglichkeit zur Bestimmung der Translationen stellt der direkte Abgriff, welcher beispielsweise per Messstab erfolgt, dar. Eine weitere Alternative ist eine photogrammetrische Bestimmung. Für den Fall, dass der Koordinatenursprung im Inneren eines Sensors liegt, werden zusätzliche Informationen über dessen genaue Lage bzw. über die Orientierung der Koordinatenachsen im Bezug zum Gehäuse benötigt. Liegen diese Informationen vor, so kann durch eine entsprechende Anordnung und Ausrichtung (parallele Achsen) der einzelnen Sensoren die Bestimmung der 6 DoF und damit die Transformation der Daten vereinfacht werden. Diese Vorgehensweise ist jedoch von den Angaben welche bzgl. der Sensoren veröffentlicht werden abhängig. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Sensoren bestimmte Fertigungstoleranzen aufweisen werden. Es ist also je nach Art der Anwendung zu unterscheiden, ob diese Vorgehensweise ausreichend ist. Werden z. B. Genauigkeiten bei den Translationen von < 1 mm und bei den Rotationen < 10 mgon verlangt, so wird diese Vorgehensweise nicht ausreichende sein. Dies bedeutet, dass die 6 DoF durch eine alternative Vorgehensweise verbessert werden müssen bzw. komplett neu zu bestimmen sind. In den letzten Jahren wurden hierfür unterschiedlichste Ansätze entwickelt. In Heinz (2021, S. 11-14) werden die Ansätze in Sensor-, Entropie- und Geometrie-basierte klassifiziert. Bei einigen Umsetzungen kommt es auch zu einer Kombination von verschiedenen Ansätzen, siehe z. B. Keller (2015, S. 181). Im Folgenden sollen die Ansätze kurz vorgestellt werden.

Sensor- und Entropie-basierte Ansätze

Beim Sensor-basierten Ansatz wird externe Sensorik für die Bestimmung der 6 DoF verwendet. Hierzu zählen beispielsweise Tachymeter (Strübing, 2015) und Lasertracker (Schön u. a., 2018). Des Weiteren sind Streifenlichprojektoren (Keller und Sternberg, 2013) und photogrammetrische Sensoren (Vennegeerts, 2011) zu nennen. Die erreichbaren Genauigkeiten sind jedoch begrenzt, da der Ursprung und die Orientierung der lokalen Sensorkoordintensysteme nicht direkt bestimmt werden können. In Vennegeerts (2011), werden bei den Translationen Standardabweichungen von 1-2 mm und bei den Rotationen 0.05° erreicht. Für den Fall, dass der verwendete Laserscanner im 3D-Modus betrieben werden kann, bietet sich die Verwendung von Zielzeichen an. Die Vorgehensweise entspricht der, welche bei der Registrierung bzw. Georeferenzierung beim s-TLS vorgestellt wurde, siehe Abschnitt 2.5.2. Die gesuchten 6 DoF werden durch eine 3D-Helmert-Transformation bestimmt. Die Grundlage dafür bilden Passpunkte, welche zum einen durch den Laserscanner und zum anderen durch einen externen Sensor erfasst werden. In Hesse (2007) wird dafür ein Theodolit-Messsystem verwendet. In Paffenholz (2012) werden für die Signalisierung der Passpunkte Referenzkugeln verwendet. Diese werden gemeinsam durch den Laserscanner und einem Lasertracker erfasst. Als Genauigkeiten für die Translationen werden Standardabweichungen von 1-2 mm und für die Rotation mit $< 0,01^{\circ}$ angegeben.

Des Weiteren sind die *Entropie-basierten* Ansätze zu nennen. Diese können sehr einfach umgesetzt werden und sind daher sehr vielseitig einsetzbar. Primär werden hierfür Informationen aus dem Objektraum verwendet. Die Grundidee ist, dass die erfasste Punktwolke auf Inkonsistenzen, welche aus einer fehlerhaften Position oder Orientierung resultieren, überprüft wird. Durch eine Anpassung der 6 DoF erfolgt eine Minimierung der Inkonsistenzen. Hierbei wird eine beliebige Umgebung unter Änderung der Position und Orientierung durch das MSS erfasst. Die Punktwolke wird durch eine WDF realisiert, welche die Wahrscheinlichkeit angibt, mit welcher ein Punkt an einer bestimmten Stelle beobachtet wird, vergleiche Sheehan u. a. (2014). Mit Hilfe der quadratischen Rényi-Entropie der WDF wird eine Kostenfunktion aufgestellt. Die Konsistenz in der Punktwolke wird durch eine iterative Anpassung der 6 DoF erreicht. Abschließend muss eine Punktwolke mit geordneten Objektraumstrukturen eine höhere Konsistenz aufweisen als eine mit ungeordneten. Als Beispiele sind Elseberg u. a. (2013), Keller (2015) und Hillemann u. a. (2019b) zu nennen. Als maßgebliche Faktoren, von welchen die Genauigkeit der Bestimmung der 6 DoF in der Systemkalibrierung abhängt, sind die Struktur der Umgebung und die gefahrene Trajektorie zu nennen (Hillemann u. a., 2019a).

Geometrie-basierte Ansätze

Da beim TLS die Daten flächenhaft erfasst werden, ist die Nutzung eines Geometrie-basierten Ansatzes naheliegend. Des Weiteren sind diese Ansätze besonders für k-TLS-basierte MSS, bei welchen die Objekterfassung im 2D-Modus erfolgt, von Interesse. Hierbei kann es im Falle von Ansätzen, welche auf der Verwendung von Passpunkten (Zielzeichen) basieren, zu Problemen kommen. Für die im Folgenden beschriebenen Umsetzungen erfolgt eine Kombination von mehreren Ansätzen. Dabei werden die 6 DoF vorerst durch ein anderes Verfahren (z. B. durch Abgriff im einen Messstab oder Sensor-basiert) näherungsweise bestimmt. Anschließend wird dann ein Geometrie-basierter Ansatz durchgeführt, mit dem Ziel die Werte zu verbessern. Hierbei liegt der Fokus oft auf den Rotationen, da diese im Falle von längeren Zielweiten zu größere Abweichung führen. Dies ist speziell beim Airborne Laserscanning (ALS) der Fall. Hier können die Zielweiten 200 - 1000 m erreichen. (Filin, 2001) stellen daher einen Ansatz vor, welcher gescannte ebene Flächen verwendet. Die Ebenen werden zum einen durch ALS und zum anderen durch GNSS-Messungen bestimmt. Im Rahmen einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadraten werden die Rotationen und die Additionskonstante für die Distanzmessung des Laserscanners bestimmt. In Skaloud und Lichti (2006) wird der Ansatz etwas abgewandelt. Die Erfassung der Ebenen erfolgt ausschließlich mit ALS. Durch Ausgleichung mit speziellen Bedingungsgleichungen werden die Parameter der Ebenen und die Rotationen gemeinsam bestimmt. Diese Vorgehensweise wird auch für k-TLS-basiertes MSS angewendet, siehe z. B. Glennie (2012). Wobei in diesem Fall der Ansatz erweitert wird, mit dem Ziel zusätzlich die Translationen sowie Sensor-interne Parameter zu bestimmen. Auch in Rieger u.a. (2010) werden die Rotationen verbessert. Hierfür werden mit einem k-TLS-basierten MSS Fahrten, welche eine bestimmte Ausrichtung zu geeigneter Objektstrukturen (z. B. Hauswänden) haben, durchgeführt. Die Verbesserung erfolgt iterativ über korrespondierende Ebenen und mit Hilfe eines modifizierten ICP-Algorithmus. Eine ähnliche Vorgehensweise verfolgen auch Shahraji u.a. (2020) und Shahraji und Larouche (2022), wobei hier mit Hilfe einer vorab durchgeführten Simulation die Auswirkungen von systematischen Abweichungen bei den Rotationen untersucht werden. Als Resultat wird eine bestmögliche Konstellation von RE dargestellt.

Des Weiteren existieren noch einige spezielle Abwandlungen des Geometrie-basierten Ansatzes. Zu nennen sind hier Le Scouarnec u. a. (2014), welche die Koplanaritäts- und Orthogonalitätsbeziehung zwischen unterschiedlichen Scanlinien und einer Ebenennormale verwendet. Eine weitere Abwandlung erfolgt in Jian und Ravani (2016), hier wird ein ebenes Schachbrett gescannt. Auf Basis der berechneten Linienschnitten und den vorab bekannten Abstandsbeziehungen erfolgt schließlich die Ausgleichung der Rotationen. Als Genauigkeitsangaben für die Rotationen werden bei Le Scouarnec u. a. (2014) Standardabweichungen von $0,03^{\circ}$ und eine maximale Abweichung von $0,09^{\circ}$ zu den Sollwerten in Jian und Ravani (2016) angegeben. In Underwood u. a. (2007) wird ein Stab (Zylinder) und der Boden (Ebene) gescannt. Mit Hilfe einer Kostenfunktion werden die durchschnittlichen quadratischen Abstände minimiert und die Translationen sowie Rotationen bestimmt. Die verbleibenden Abweichungen betragen 3 cm. In Gräfe (2008) werden drei unterschiedlich angeordnete RE verwendet. Diese werden im 2D-Modus durch einen Laserscanner erfasst. Für jede der RE wird anschließend eine Gerade geschätzt. Die Schnittgerade wird vorab zusätzlich linienhaft mit einem Tachymeter erfasst und über Verknüpfungsmessungen in den Body-frame *b* transformiert. In einem GHM erfolgt anschließend die Bestimmung der 6 DoF. Als Beobachtungen werden die mit dem Laserscanner erfassten Profilpunkte und die vorab geschätzten Geraden eingeführt. Für die Rotationen werden Standardabweichungen von $< 0,01^{\circ}$ und für die Translationen mit < 1 mm bestimmt. Durch eine Validierung konnten keine größeren systematische Abweichungen festgestellt werden.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass diverse Ansätze zur Bestimmung der 6 DoF existieren. Teilweise lassen sich diese sogar simultan zur 3D-Objekterfassung durchführen (Selbstkalibrierung). Dies stellt einen positiven zeitlichen Einspareffekt dar. Jedoch werden nicht in allen Fällen die gesamten 6 DoF bestimmt. Zu beachten ist des Weiteren, dass eine unterschiedliche Anordnung und Orientierung der RE (Sensitivität) vorliegen muss bzw., dass die Fahrten in unterschiedlichen Richtung erfolgen müssen. Ist dies nicht der Fall, können Probleme auftreten. Auf die Bedeutung der Sensitivität wird später im Abschnitt 4.3.1 näher eingegangen. Bei terrestrischen MSS wird beispielsweise die Translation t_z schlechter bestimmt, siehe Glennie (2012). Ein weiteres Problem ist, dass die erreichbaren Genauigkeiten oft nur schwer zu beurteilen sind. Es ist festzustellen, dass in den meisten Beiträgen kein Vergleich mit einer Referenz (Validierung), welche eine höhere Genauigkeit um den Faktor 10 besitzt, erfolgt. Diese Vorgehensweise wird in Hong u. a. (2017) aufgegriffen. Hier werden die RE vorab per s-TLS erfasst. Die Ausgleichung der 6 DoF erfolgt über eine bestimmte Auswahl von RE. Die restlichen RE werden für die Validierung der Ergebnissse verwendet. Die Abweichungen betragen durchschnittlich ca. 1 cm.

Wie bereits im Abschnitt 2.1 erwähnt, ergeben sich aufgrund der hier vorgegebenen hohen Gesamtgenauigkeitsanforderung von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm bei der k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung entsprechende Anforderungen an die Systemkalibrierung. Speziell die Bestimmung der Rotationen und das Erreichen der nötigen Genauigkeiten, vergleiche Abschnitt 2.7.2, erscheint mit den bisher vorgestellten Ansätzen schwierig. Vor diesem Hintergrund lohnt sich die Betrachtung des RG-basierten Ansatzes, welcher in Strübing und Neumann (2013) vorgestellt wurde. Dieser Ansatz ist primär auf alle Sensoren, welche nach dem Light Detection and Ranging (LIDAR)-Prinzip arbeiten, anwendbar. Ein weiterer Aspekt ist, dass dieser Ansatz auf beliebige Oberflächen, welche kontinuierlich mathematisch beschreibbar sind, angewendet werden kann. Hierzu zählen z. B. Ebene, Kugel oder Zylinder. Konkrete Anwendung fand der Ansatz in den letzten Jahren bei der Systemkalibrierung von k-TLS-basierte MSS. Die Objekterfassung erfolgt dabei durch einen Laserscanner. Dieser misst statisch und wird im 2D-Modus betrieben. Als RG wurden aufgrund ihrer einfachen Darstellung und Umsetzung RE gewählt. Beispielhaft sind die Arbeiten von Dorndorf u.a. (2015), Strübing (2015), Heinz u. a. (2015), Heinz u. a. (2016), Keller (2015) und Hartmann u. a. (2017) zu nennen. Da sich die Anordnung und Orientierung der RG maßgeblich auf die Parameterbestimmung bei der Systemkalibrierung auswirkt, gab es in den letzten Jahren einige Untersuchungen, welche das Ziel hatten diese zu optimieren. Zu nennen sind hier Dorndorf (2014), Keller (2015) und Heinz u.a. (2017). Das Thema Optimierung der Anordnung und Orientierung von RG wird auch im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und detailliert im Abschnitt 4.3.4 beschrieben. Des Weiteren spielt der zeitliche Rahmen bei der Durchführung der Systemkalibrierung eine wichtige Rolle. Da die Durchführung der Messungen zum Teil sehr zeitaufwendig sein kann, ist es das Ziel diese zu beschleunigen. Um dies zu erreichen, wird zunehmend auf die Verwendung von festen Kalibrierumgebungen übergegangen. In Strübing und Neumann (2013) wird eine aus fünf Ebenen bestehende, fest verschraubbare Anordnung von RE verwendet. Diese kann relativ zum k-TLS-basierten MSS ausgerichtet werden. In Keller (2015) und Hartmann u. a. (2019) werden jeweils einstellbare, aber final fest verschraubbare Anordnungen von RE vorgestellt. In Dennig u.a. (2017) wird ein fest montierbarer Referenzkörper, welcher aus 61 unterschiedlich orientierten RE besteht, verwendet. Auch hier erfolgt vorab eine Optimierung von Anordnung und Orientierung der RE mit Hilfe einer Simulation. In Heinz u.a. (2020) und Heinz (2021) wird eine permanente Kalibrierumgebung präsentiert, welche aus unterschiedlichen ebenen Betonelementen besteht. Die Realisierung der Umgebung erfolgte permanent und im Außenbereich.

Einen weiteren Aspekt für die Beschleunigung der Durchführung bei der Systemkalibrierung stellt die Bestimmung der 6 DoF aus dem bewegten Zustand dar. Dies stellt die Grundlage für eine effiziente Selbstkalibrierung des k-TLS-basierten MSS dar. In Hartmann u.a. (2017) und Heinz (2021) erfolgt die Bestimmung der 6 DoF aus einem bewegten Zustand. Wobei hierbei anzumerken ist, dass in diesen Umsetzungen keine punktweise Zustandsbestimmung für die Georeferenzierung erfolgt. In Heinz (2021) wird für jedes Profil eine mittlere Position und Orientierung verwendet. Diese Vorgehensweise ist bei einer gleichmäßigen und langsamen Bewegungsform (Geschwindigkeit 1 m/s) sowie einer hohen Rotationsgeschwindigkeit (hier 200 rps) ausreichend, siehe Heinz (2021, S. 56). Einen weiteren Aspekt stellt die Genauigkeit der verwendeten georeferenzierenden Hardware dar. Ist diese um eine Größenordnung (Faktor 10 und mehr) höher als die vernachlässigten Punktverschiebungen, so wird die entstehende Systematik keinen signifikanten Effekt haben. Liegen jedoch hohe Genauigkeitsanforderungen oder eine dynamische Bewegungsform (im speziellen schnelle Anderungen in den Rotationen) bei gleichzeitig niedriger Drehgeschwindigkeit des Laserscanners vor, ist eine solche Betrachtung nicht ausreichend. Eine Möglichkeit dies mit zu betrachten, stellt z. B. eine Interpolation oder eine Filteransatz, welcher die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen mitbestimmt dar. Die Vorgehensweise ist in Hartmann u.a. (2018b) beschrieben und wird auch im Rahmen des Kapitels 5 bei der Georeferenzierung des verwendeten k-TLS-basierten MSS genauer beschrieben. In Vogel u. a. (2022) wird der Ausgleichungsansatz erweitert. Hierbei erfolgt die Schätzung der 6 DoF unter Ausnutzung von Bedingungen in einem rekursiven GHM. Besonders vorteilhaft hierbei ist die sehr effiziente Prozessierung. Dies bietet sich im Falle einer Verwendung von mehrere Sensoren, welche insgesamt große Datenmengen erzeugen, an.

4.2 Darstellung des Referenzgeometrie-basierten Ansatzes

In diesem Abschnitt wird auf die Auswertung und Prozessierung der Systemkalibrierung für das im Abschnitt 2.7.4 beschriebene k-TLS-basierte MSS eingegangen. Dafür kommt das von Strübing und Neumann (2013) publizierte RG-basierte Verfahren zum Einsatz. Dieser Ansatz ist allgemein gültig und kann somit auf alle Arten von LIDAR-Sensoren anwendet werden. Des Weiteren sind unterschiedliche Sensoren für die Georeferenzierung denkbar. Daraus folgt, dass die originären Beobachtungen unterschiedlich sein können. Aus streng methodischer Sicht ist deren Verwendung empfehlenswert. Werden z. B. polare Messelemente erfasst, können diese mit Hilfe der Gleichung 2.1 in kartesische Koordinaten überführt werden. Im einfachsten Fall ist jedoch eine direkt Beobachtung der benötigten Größen möglich, welche im Anschluss verwendet werden können. Ein Beispiel stellen z. B die 6 DoF der Georeferenzierung dar. Aber auch die Verwendung von abgeleiteten Größen ist denkbar. Hierfür sprechen meist praktische Gesichtspunkte, wie ein einfacherer Umgang (Größe) mit dem zu lösenden Normalgleichungssystem und eine effizientere Prozessierung im Falle von großen Datenmengen. Die Aufstellung des funktionalen Zusammenhangs bleibt daher immer eine Einzelfallentscheidung. Diese ist abhängig vom verwendeten Messverfahren und von der eingesetzten Sensorik. Daher wird an dieser Stelle aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit eine allgemeinere Darstellungsform gewählt. Dies betrifft die im Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Parametrisierung der RG, sowie die in den Gleichungen 4.5 und 4.6 dargestellten Größen.

Das wesentliche Ziel einer Systemkalibrierung ist die Bestimmung der 6 DoF zwischen dem Koordiantensystem des erfassenden Sensors s und dem Body-Frame b. Dies sind je drei Translationen und Rotationen, welche im Folgenden mit den Vektoren

$$\boldsymbol{t}|_{s}^{b} = [t_{X} \ t_{Y} \ t_{Z}]^{T}|_{s}^{b} \text{ und } \boldsymbol{\varpi}|_{s}^{b} = [\omega \ \varphi \ \kappa]^{T}|_{s}^{b}$$

$$(4.1)$$

zusammengefasst werden. Der Gesamtablauf des Verfahrens gliedert sich dabei in drei wesentliche Schritte. Diese sind in der Abbildung 4.1 dargestellt und werden in den folgenden drei Abschnitten 4.2.1 - 4.2.3 erläutert.



Abbildung 4.1: Grundlegender Ablauf der Systemkalibrierung, mit den wesentlichen Schritten, Schaffung einer Kalibrierumgebung, Objekterfassung durch das k-TLS-basierte MSS und Parameterschätzung im Ausgleichungsmodell.

4.2.1 Schaffung Kalibrierumgebung - Bestimmung der Referenzgeometrien

In einem ersten Schritt erfolgt die Bestimmung der RG. Hierbei ist darauf zu achten, dass diese abschließend in einem einheitlichen Koordinatensystem vorliegen. Soweit vorhanden, bietet sich die Verwendung eines übergeordneten Referenzkoordinatensystem r an. Um die Genauigkeiten zu steigern und einen möglichst effizienten Ablauf der Messungen zu ermöglichen, wird die Schaffung einer festen Kalibrierumgebung empfohlen. Auf die Details wird im späteren Verlauf der Arbeit noch eingegangen. Die RG werden in die beiden folgenden wesentlichen Arten unterschieden:

- 1. einfach mathematisch definierte RG bzw.
- 2. beliebige, nicht mathematisch definierte RG.

Zum ersten Fall gehören die geometrischen Standardformen, wie Ebene, Kugel, Kegel, Zylinder sowie Hyperboloid und Paraboloid. Die Bestimmung von Form und Lage erfolgt durch die von Drixler (1993) beschriebenen Methode der quadratischen Formen. Durch die darin abgeleiteten Parameter, welche im Vektor $a_{RG_i}|_r$ zusammengefasst werden, ist eine eindeutige Definition der RG gegeben. Durch die Variable *i* wird die Anzahl (1, ..., k) der verwendeten RG_i angegeben. Für Details zur Bestimmung wird auf den Abschnitt 3.4 verwiesen. Da dies für den weiteren Verlauf der Arbeit von Interesse ist, werden hier die Parametervektoren a_{RG_i} für Ebenen und für allgemeine quadratische Formen dargestellt. Für eine Ebene gilt

$$\boldsymbol{a}_{RG_i} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{n}_{RG_i} & d_{O_{RG_i}} \end{bmatrix}^T |_r, \tag{4.2}$$

wobei $\mathbf{n}_{RG_i} = [n_x \ n_y \ n_z]_{RG_i}^T |_r$ den normierter Normalenvektor und $d_{O_{RG_i}}|_r$ den Abstandsparameter zum Ursprung (O) von r darstellen. Des Weiteren gilt für quadratische Formen die allgemeinen Darstellung mit

$$\boldsymbol{a}_{RG_{i}} = \begin{bmatrix} a_{1} \ a_{2} \ a_{3} \ a_{4} \ a_{5} \ a_{6} \ a_{7} \ a_{8} \ a_{9} \ a_{10} \end{bmatrix}_{RG_{i}}^{T} |_{r}.$$

$$(4.3)$$

Unter der zweiten aufgelisteten Art sind komplexere RG, welche keine der Standardformen entsprechen, zu zählen. Die Oberflächen der RG werden in diesem Fall entsprechend approximiert. Dies kann z. B. mit Hilfe von Splines erfolgen. Bei der Umsetzung ist jedoch darauf zu achten, dass die Oberflächen dieser Flächen mit einer höheren Anzahl von Punkten, als bei der Erfassung mit dem k-TLS-basierten MSS im Rahmen der Systemkalibrierung, erfassen werden. In Strübing (2015) wird festgehalten, dass grundsätzlich jede Oberflächengeometrie als RG verwendet werden kann. Jedoch steigt mit zunehmender Unregelmäßigkeit der Oberflächenstruktur der Aufwand der mathematischen Modellierung. Daher sollte in der praktischen Anwendung nur auf einfache mathematisch definierte RG zurückgegriffen werden. Dies wird in Rahmen dieser Arbeit befolgt. Jede RG wird durch eine definierte Funktion $\mathbf{Z}(\phi)$ beschrieben. Für die einzelnen RG_i gilt

$$\boldsymbol{Z}_i = \phi(\boldsymbol{a}_{RG_i}|_r). \tag{4.4}$$

4.2.2 Objekterfassung und Verknüpfung der Koordinatensysteme

Die Erfassung der RG_i erfolgt zum einen durch den jeweiligen verwendeten Aufnahmesensor des k-TLS-basierten MSS. Die Darstellung an dieser Stelle erfolgt hier als j kartesische Koordinaten, welche im lokalen Koordinatensystem s des Sensors vorliegen. Diese werden im Vektor

$$\boldsymbol{x}_{j_{RG_i}|s} = \begin{bmatrix} X_j \ Y_j \ Z_j \end{bmatrix}_{RG_i}^T |_s \tag{4.5}$$

zusammengefasst. Um den Übergang von r in den Bodyframe b zu realisieren, werden je drei Translationen $(t_X, t_Y, t_Z) |_b^r$ und Rotationen $(\omega, \varphi, \kappa) |_b^r$ benötigt. Für diese gilt

$$\boldsymbol{t}|_{b}^{r} = \begin{bmatrix} t_{X} \ t_{Y} \ t_{Z} \end{bmatrix}^{T} |_{b}^{r} \quad \text{und} \quad \boldsymbol{\varpi}|_{b}^{r} = \begin{bmatrix} \omega \ \varphi \ \kappa \end{bmatrix}^{T} |_{b}^{r}.$$

$$(4.6)$$

Als grundlegender Ansatz wird die Restriktion, dass die Abstände d_j zwischen der entsprechenden RG_i und den $j = 1 \dots m_i$ Koordinaten der erfassten Punkte $x_{j_{RG_i}}|_s$ im übergeordneten Referenzkoordinatensystem r Null sein müssen, eingeführt. Die in der Gleichung 4.1 aufgelisteten Größen, stellen dabei die Parameter in einem Ausgleichungsmodell dar. Bei Vorliegen der Flächenparameter a_{RG_i} wird die Bedingung wie folgt in Form eines funktionalen Modells im GHM formuliert

$$d_j = 0 = f_i(\tilde{\boldsymbol{x}}_{j_{RG_i}}|_s, \ \tilde{\boldsymbol{a}}_{RG_i}|_r, \ \tilde{\boldsymbol{t}}|_s^b, \ \tilde{\boldsymbol{\omega}}|_s^b, \ \tilde{\boldsymbol{t}}|_b^r, \ \tilde{\boldsymbol{\omega}}|_b^r).$$
(4.7)

Wobei (~) hier für den wahren Wert steht. Für die Formulierung werden bewusst keine geschätzte Größen verwendet, da die Gleichung 4.7 in diesem Fall von den Eigenschaften des Schätzers und der stochastischen Eingangsgrößen abhängt (Strübing und Neumann, 2013). Die j Koordinaten $x_{jRG_i}|_s$ der RG_i stellen in diesem Fall Beobachtungen im Ausgleichungsmodell dar. Bei den Transformationsparametern, siehe Gleichung 4.6, als auch bei den Flächenparametern a_{RG_i} ist jeweils zu entschieden, ob diese als stochastische Parameter gelten. Das bedeutet, dass hierfür Varianz-Kovarianz-Information einzuführen sind. Alternativ können diese auch als deterministisch betrachtet werden. In diesem Fall gehen keine Vorinformation in das Ausgleichungsmodell ein. Haben die Unsicherheiten dieser Größen einen signifikant Einfluss auf die Unsicherheiten der unbekannten Parameter, so sind die Varianz-Kovarianz-Information im Ausgleichungsmodell zu berücksichtigen. Die in Gleichung 4.7 dargestellte Bedingung kann weiter präzisiert werden. Bei jedem gewählten Ansatz werden die j Koordinaten $x_{jRG_i}|_s$ der RG_i zunächst nach b und anschließend nach r überführt. Nach Einsetzen in die Gleichungen 2.2 - 2.4, ergibt sich somit der Vektor $x_{jRG_i}|_r$, welches die j Punktkoordinaten der RG_i in r darstellt. Durch diese und den in der Gleichung 4.4 beschriebenen RG_i wird als zentrales Kriterium der Ausgleichung die euklidische Abstandsfunktion

$$df(\boldsymbol{x}_{jRG_i}|_r, Z_i(\phi)) \tag{4.8}$$

definiert. Diese muss die folgenden Eigenschaften besitzen:

- sie existiert und ist mathematisch (geschlossen) beschreibbar und
- sie ist (stetig) differenzierbar.

Die hier genannten Bedingungen sind notwendig, um die Schätzung z. B. in einem GHM durchführen zu können. Die endgültige Festlegung der Abstandsfunktion für die jeweilige Problemstellung soll dem Leser überlassen werden. Im Falle des Einsatzes von lokalen Optimierungsverfahren ist bei der Schätzung der Parameter weiterhin die Konvergenz zum globalen Minimum vorauszusetzen. Dies ist jedoch keine methodische oder modelltheoretische Voraussetzung, sondern lediglich von der Wahl des Minimierers abhängig. Nach Einsetzen der Parameter einer RE aus 4.2 und der Koordinaten $\boldsymbol{x}_{j_{RG_i}}|_r$ in die Abstandsfunktion 4.8 vereinfacht sich 4.7 zu

$$\begin{aligned} d_{j_{RG_{i}}} &= 0 = f_{i}(\tilde{\boldsymbol{x}}_{j_{RG_{i}}}|_{s}, \ \tilde{\boldsymbol{a}}_{RG_{i}}|_{r}, \ \tilde{\boldsymbol{t}}|_{s}^{b}, \ \tilde{\boldsymbol{\varpi}}|_{s}^{b}, \ \tilde{\boldsymbol{t}}|_{b}^{r}, \ \tilde{\boldsymbol{\varpi}}|_{b}^{r}) \\ &= \tilde{\boldsymbol{x}}_{j_{RG_{i}}} \frac{\tilde{\boldsymbol{n}}_{RG_{i}}}{|\tilde{\boldsymbol{n}}_{RG_{i}}|} - \tilde{d}_{O_{RG_{i}}} \\ &= \frac{\tilde{n}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{y_{RG_{i}}} \ \tilde{y}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{z_{RG_{i}}} \ \tilde{z}_{j_{RG_{i}}}}{\sqrt{\tilde{n}_{x_{RG_{i}}}^{2} + \ \tilde{n}_{y_{RG_{i}}}^{2} + \ \tilde{n}_{z_{RG_{i}}}^{2}}} - \ \tilde{d}_{O_{RG_{i}}} \\ &= \tilde{n}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{y_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{z_{RG_{i}}}^{2} + \ \tilde{n}_{z_{RG_{i}}}^{2}} - \ \tilde{d}_{O_{RG_{i}}} \\ &= \tilde{n}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{y_{RG_{i}}} \ \tilde{y}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{z_{RG_{i}}} \ \tilde{z}_{j_{RG_{i}}} - \ \tilde{d}_{O_{RG_{i}}} \\ &= \tilde{n}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{y_{RG_{i}}} \ \tilde{y}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{z_{RG_{i}}} \ \tilde{z}_{j_{RG_{i}}} - \ \tilde{d}_{O_{RG_{i}}} \\ &= \tilde{n}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{y_{RG_{i}}} \ \tilde{y}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{z_{RG_{i}}} \ \tilde{z}_{j_{RG_{i}}} - \ \tilde{d}_{O_{RG_{i}}} \\ &= \tilde{n}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{y_{RG_{i}}} \ \tilde{y}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{z_{RG_{i}}} \ \tilde{z}_{j_{RG_{i}}} - \ \tilde{d}_{O_{RG_{i}}} \\ &= \tilde{n}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{y_{RG_{i}}} \ \tilde{y}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{z_{RG_{i}}} \ \tilde{z}_{j_{RG_{i}}} - \ \tilde{d}_{O_{RG_{i}}} \\ &= \tilde{n}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{y_{RG_{i}}} \ \tilde{y}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{z_{RG_{i}}} \ \tilde{z}_{j_{RG_{i}}} - \ \tilde{d}_{O_{RG_{i}}} \\ &= \tilde{n}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{n}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} - \ \tilde{u}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} - \ \tilde{u}_{x_{RG_{i}}} \ \tilde{x}_{j_{RG_{i}}} \ \tilde$$

Analog gilt mit den Parametern einer quadratischen Form aus Gleichung 4.3

$$d_{j_{RG_{i}}} = 0 = f_{i}(\tilde{\boldsymbol{x}}_{j_{RG_{i}}}|_{s}, \ \tilde{\boldsymbol{a}}_{RG_{i}}|_{r}, \ \tilde{\boldsymbol{t}}|_{s}^{b}, \ \tilde{\boldsymbol{\varpi}}|_{s}^{b}, \ \tilde{\boldsymbol{t}}|_{b}^{r}, \ \tilde{\boldsymbol{\varpi}}|_{b}^{r})$$

$$= \tilde{\boldsymbol{x}}_{j_{RG_{i}}}^{T} \begin{bmatrix} \tilde{a}_{1} & \frac{\tilde{a}_{4}}{\sqrt{2}} & \frac{\tilde{a}_{5}}{\sqrt{2}} \\ \frac{\tilde{a}_{4}}{\sqrt{2}} & \tilde{a}_{2} & \frac{\tilde{a}_{6}}{\sqrt{2}} \\ \frac{\tilde{a}_{5}}{\sqrt{2}} & \frac{\tilde{a}_{6}}{\sqrt{2}} & \tilde{a}_{1} \end{bmatrix}_{RG_{i}} \qquad \tilde{\boldsymbol{x}}_{j_{RG_{i}}} + \ \tilde{\boldsymbol{x}}_{j_{RG_{i}}}^{T} \begin{bmatrix} \tilde{a}_{7} \\ \tilde{a}_{8} \\ \tilde{a}_{9} \end{bmatrix}_{RG_{i}} + \ \tilde{a}_{10_{RG_{i}}}.$$

$$(4.10)$$

Wie zu erkennen ist, entspricht der Abstand d_j bei einer Formulierung in einem GHM dem Widersprüchen w_j (vgl. Abschnitt 4.4.3). In einem GHM werden die Widersprüche senkrecht auf den Parameterraum projiziert. Dies führt auch im Falle einer quadratischen Form nach 4.3 dazu, dass die Abstände zu den jeweiligen Punkten $x_{jRG_i}|_r$ minimiert werden. In beiden Gleichungen 4.9 und 4.10 wurde als Abstandsfunktion 4.8 gewählt. Dadurch wird sichergestellt, dass es sich um die euklidische Distanz zwischen den Koordinaten $x_{jRG_i}|_r$ und deren orthogonale Projektion auf die RG handelt.

Abschließend sind für die eingangs des Abschnitts in Gleichung 4.1 dargestellten gesuchten Parameter Näherungswerte zu bestimmen. Diese werden im Vektor x_0 zusammengefasst:

$$\boldsymbol{x}_0|_s^b = \begin{bmatrix} \boldsymbol{t}_0 & \boldsymbol{\varpi}_0 \end{bmatrix}^T |_s^b.$$
(4.11)

Es obliegt dabei dem Durchführenden, wie die Bestimmung der Näherungswerte erfolgt. Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie z. B. die Verwendung von Werten aus einer vorhergehenden Messung. Dies setzt jedoch die Verwendung von gleichen Sensoren und eine ähnliche Anordnung derer voraus. Des Weiteren kann die Erfassung der Näherungswerte durch direkten Abgriff erfolgen. Hierzu ist jedoch Kenntnis über die Ausrichtung des lokalen Koordinatensystems erforderlich. Zusammenfassend ist jedoch zu sagen, dass sich möglichst genau bestimmte Näherungswerte positiv auf die Parameterschätzung auswirken. Dies wird im Regelfall zu einer schnelleren Konvergenz führen und die vermeiden, dass die Lösung zu einem lokalen Minimierung erfolgt.

4.2.3 Ausgleichung der gesuchten Parameter

In diesem Abschnitt wird die Bestimmung der gesuchten Parameter durch Ausgleichung in einem GHM beschrieben. Die mathematischen Grundlagen und der Ablauf der einzelnen Schritte sind im

Abschnitt 3.3 dargestellt. An dieser Stelle wird auf die konkret auf die Systemkalibrierung eines k-TLS-basiertes MSS eingegangen, welche auf RG basiert. Exemplarisch wird die Aufstellung des funktionalen und stochastischen Modells gezeigt.

Funktionales Modell

Wie bereits eingangs des Abschnittes erwähnt, kann sich die Art der Beobachtungen unterscheiden und wird hier daher in einer allgemeine Form gehalten. Die Beobachtungen sind die im Vektor $\boldsymbol{x}_{j_{RG_i}}|_s$ zusammengefassten kartesischen Koordinaten, siehe Gleichung 4.6. Des Weiteren werden die im Vektor $\boldsymbol{a}_{RG_i}|_r$ zusammengefassten Flächenparameter verwendet, siehe Abschnitt 4.2.1. Darüber hinaus werden die Translationen $\boldsymbol{t}|_b^r$ und Rotationen $\boldsymbol{\varpi}|_b^r$, welche in Gleichung 4.6 definiert werden, verwendet. Der Beobachtungsvektor \boldsymbol{l} ergibt sich somit

$$\boldsymbol{l} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{j_{RG_1}} \dots \boldsymbol{x}_{j_{RG_k}} |_s & \boldsymbol{a}_{RG_1} \dots \boldsymbol{a}_{RG_k} |_r & \boldsymbol{t} |_b^r & \boldsymbol{\varpi} |_b^r \end{bmatrix}^T.$$
(4.12)

Die primären Zielgrößen der Ausgleichung sind die in der Gleichung 4.1 dargestellten Translationen $t|_s^b$ und Rotationen $\varpi|_s^b$. Da die in der Gleichung 4.12 eingeführten Beobachtungsgruppen zum Teil abgeleitete Größen sein können, welche dann im Rahmen der Ausgleichung mit aufdatiert werden, sind diese sogleich wieder als Parameter einzuführen. Als Parametervektor x ergibt sich somit

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{t}|_{s}^{b} \quad \boldsymbol{\varpi}|_{s}^{b} \quad \boldsymbol{a}_{RG_{1}} \cdots \boldsymbol{a}_{RG_{k}}|_{r} \quad \boldsymbol{t}|_{b}^{r} \quad \boldsymbol{\varpi}|_{b}^{r} \end{bmatrix}^{T}$$

$$= \begin{bmatrix} (t_{X} \ t_{Y} \ t_{Z} \ \omega \ \varphi \ \kappa)|_{s}^{b} \quad \boldsymbol{a}_{RG_{1}} \cdots \boldsymbol{a}_{RG_{k}}|_{r} \quad \boldsymbol{t}|_{b}^{r} \quad \boldsymbol{\varpi}|_{b}^{r} \end{bmatrix}^{T}.$$

$$(4.13)$$

Das funktionale Modell wird wie folgt dargestellt

$$f(\tilde{\boldsymbol{l}}, \tilde{\boldsymbol{x}}) = \begin{bmatrix} f_1 = \left((\tilde{t}_X, t_Y, t_Z, \tilde{\omega}, \tilde{\varphi}, \tilde{\kappa}) |_s^b, \tilde{\boldsymbol{x}}_{j_{RG_1}} |_s, \tilde{\boldsymbol{a}}_{RG_1} |_r, \tilde{\boldsymbol{t}} |_b^r, \tilde{\boldsymbol{\varpi}} |_b^r \right) \\ \vdots \\ f_k = \left((\tilde{t}_X, t_Y, t_Z, \tilde{\omega}, \tilde{\varphi}, \tilde{\kappa},) |_s^b, \tilde{\boldsymbol{x}}_{j_{RG_k}} |_s, \tilde{\boldsymbol{a}}_{RG_k} |_r, \tilde{\boldsymbol{t}} |_b^r, \tilde{\boldsymbol{\varpi}} |_b^r \right) \end{bmatrix} = \boldsymbol{0}.$$
(4.14)

Stochastisches Modell

Das stochastische Modell der Ausgleichung ergibt sich aus der Gleichung 3.45. Die Unsicherheiten, hier in Form der Varianzen der Beobachtungen bzw. deren Kovarianzen, sind in der VKM Σ_{ll} zusammengefasst. Durch Verknüpfung mit dem a-priori-Varianzfaktor σ_0^2 , ergibt sich die Kofaktormatrix der Beobachtungen \mathbf{Q}_{ll} zu

$$Q_{ll} = \frac{1}{\sigma_0^2} \begin{bmatrix} \Sigma_{x_{j_{RG_1}}} |_s & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \Sigma_{x_{j_{RG_i}}} |_s & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \Sigma_{a_{RG_1}} |_r & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \Sigma_{a_{RG_k}} |_r & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \Sigma_t |_b^r & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \Sigma_{\varpi} |_b^r \end{bmatrix}$$
(4.15)

Es ist zu erkennen, dass in die Gesamt- Σ_{ll} die einzelnen VKM der entsprechenden (abgeleiteten) Beobachtungsblöcke einfließen. Diese sind auf der Hauptdiagonalen angeordnet. Die Nebenelemente, welche die Korrelationen zwischen den einzelnen Beobachtungsblöcken beinhalten, werden hier als unkorreliert angenommen und daher mit $\mathbf{0}$ dargestellt. In Falle einer vollständigen Betrachtung müssten diese mit eingeführt werden. Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, dass die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Beobachtungsblöcken zum Teil sehr komplex bzw. nicht vollständig bekannt sind. Beispielhaft ist hier z. B. die Beziehungen zwischen den Blöcken mit den kartesischen Koordinaten und der Flächenparameter zu nennen. Die Ableitung der Korrelationen gestaltet sich in diesen Fällen schwierig. Des Weiteren ist anzumerken, dass eine vollbesetzte VKM mit entsprechend hoher Anzahl von Beobachtungen rechentechnisch schwerer zu handhaben ist. Daher wird hier aus praktikableren Gründen die in der Gleichung 4.15 dargestellte VKM empfohlen. Des Wei-



Abbildung 4.2: Herleitung der Korrelationen im stochastischen Modell aus physikalischen Eingangsgrößen, eigene Darstellung nach Strübing (2015)

teren kann auch die Aufstellung der einzelnen VKM der Beobachtungsblöcke zum Teil komplex sein. In Strübing (2015) ist dies am Beispiel der Flächenparameter $a_{RG_i}|_r$ dargestellt. Die hier verwendeten Flächenparameter $a_{RG_i}|_r$ stellen abgeleitete Größen dar. Sie ergeben sich mit Hilfe des funktionalen Zusammenhangs $f(x_{j,RG_i}|_r)$. Die $x_{j,RG_i}|_r$ stellen dabei die j Beobachtungen der RG_i dar. Diese Beobachtungen können ihrerseits aus den Messgrößen Y_1, Y_2 und Y_3 des Referenzgebenden Sensor über den funktionalen Zusammenhang $f(Y_1, Y_2, Y_3)$ ermittelt werden. Während diese wiederum durch die physikalische Eingangsgrößen (X_1, \ldots, X_6) beeinflusst werden können. Die entsprechenden funktionalen Zusammenhänge bestehen beispielhaft aus $Y_1 = f(X_2, X_3, X_6)$. In der Regel sind die einzelnen Messgrößen untereinander korreliert. Beispielsweise beeinflusst die Eingangsgröße X_2 in Abbildung 4.2 alle drei Messgrößen Y_1, Y_2 und Y_3 . Wird die Messunsicherheit u_{X_2} unzureichend bestimmt, beispielsweise durch die Verwendung ungenauer Werte von Normalen, pflanzt sich diese Unsicherheit über sämtliche funktionalen Zusammenhänge bis hin zu der Bestimmung der Flächenparameter $a_{RG_i}|_r$ fort. Ein Überblick der Zusammenhänge, ist in der Abbildung 4.2 dargestellt.

Des Weiteren ist zu beachten, dass derartige Messanordnungen kaum zur Aufdeckung von systematischen Messabweichungen der beteiligten Sensoren geeignet sind (Strübing und Neumann, 2013). Das stochastische Modell 4.15 enthält bei der Ableitung aus originären Beobachtungen im Wesentlichen die innere Genauigkeit (Präzision). Um die Genauigkeiten besser quantifizieren zu können kann beispielsweise über eine Messunsicherheitsanalyse nach GUM durchgeführt werden, vergleiche Abschnitt 3.2.2.

Durchführung der Parameterschätzung

Abschließend erfolgt die Schätzung der in Gleichung 4.1 dargestellten gesuchten Parameter. Der zentrale funktionale Zusammenhang ist durch die Gleichung 4.14 dargestellt. Mit Hilfe der in Gleichung 4.11 dargestellten Näherungswerte werden die partiellen Ableitungen des funktionalen Modells nach den Beobachtungen und den Unbekannten aufgestellt. Das detaillierte Vorgehen wird im Abschnitt 3.3 beschrieben. Die geschätzten Parameter \hat{x} ergeben sich aus den Normalgleichungen,

welche in 3.51 bzw. in 3.52 u. ff. dargestellt sind. Die Lösung erfolgt iterativ, bis ein entsprechendes Abbruchkriterium erreicht ist. Auf Details dazu, wird in der praktischen Umsetzung im Abschnitt 4.4.2 eingegangen. Wird die Hauptprobe, siehe Gleichung 3.57, erfüllt und der Globaltest nach Gleichung 3.60 bestanden, so ist die Schätzung der Parameter abgeschlossen. Für eine detaillierte Analyse sind eine Zuverlässigkeitsanalyse bzw. eine Ausreißerdetektion denkbar. Hierbei kann entsprechend der bekannten Vorgehensweisen im GHM vorgegangen werden (Niemeier, 2008).

Abschließend ergeben sich die Genauigkeiten der geschätzten Parameter. Die Varianzen können der Spur der in Gleichung 3.61 dargestellten VKM $\Sigma_{\hat{x}\hat{x}}$ entnommen werden. Generell ist die Vorgehensweise, wie in Koch (2002) und Lenzmann und Lenzmann (2004) beschrieben, zu empfehlen. Diese erweist sich als vorteilhaft im Falle von großen Standardabweichungen der Messgrößen. Des Weiteren haben dadurch mögliche Nichtlinearitäten eine nicht so gravierende Auswirkung auf die Parameterschätzung. Dies scheint von besonderer Relevanz, da der in dieser Arbeit verwendete funktionale Zusammenhang nichtlinear ist (vergleiche Gleichungen 2.2 – 2.4).

4.3 Anordnung der Referenzgeometrien

In diesem Abschnitt wird die Anordnung der RG im Rahmen der Systemkalibrierung thematisiert. Aus Strübing und Neumann (2013) ist Folgendes zu entnehmen:

Eine schlechte Anordnung der RG bildet sich im funktionalen Modell ab. Dies führt dazu, dass die VKM, welche sich im Rahmen der Varianz-Kovarianzfortpflanzung (bei einem adäquaten Varianz-Kovarianz-Modell) ergibt, entsprechend für die nicht optimal bestimmten Parameter große Standardabweichungen aufweist. Diese Art der Kontrolle ist jedoch aufgrund der geschilderten Defizite nicht vollständig durchgreifend, sodass auch bei der Planung des Messaufbaus bereits berücksichtigt werden sollte, dass die Anordnung der Referenzgeometrien optimal bzgl. der zu bestimmenden Parameter ist.

Im Rahmen der durchgeführten Messungen wurde die Eignung der aus fünf RE bestehende Kalibrieranordnung auf die Parameterbestimmung bewertet. Die Anordnung der RE sowie deren Klassifizierung wird in der Abbildung 4.3 dargestellt. Das grundlegende Kriterium, mit welchem die



Abbildung 4.3: Eignung eines Referenzkörpers mir fünf unterschiedlich angebrachten Ebenen hinsichtlich der zu bestimmenden Parameter für eine Profillaserscanner (Strübing und Neumann, 2013).

Bewertung hier erfolgt, wird im Rahmen dieser Arbeit als Sensitivität bezeichnet. Prinzipiell ist hierdurch die Auswirkung unterschiedlicher Ausrichtungen und Anordnungen der RG und die damit verbundenen Auswirkungen auf die zu bestimmenden Parameter gemeint. Die Grundlagen werden im Folgenden dargestellt.

Die hier dargestellten Zusammenhänge basieren auf der Verwendung eines terrestrischen Laserscanners, welcher im Profilmodus betrieben werden kann.

4.3.1 Sensitivität der Parameter

Die Sensitivität der RG stellt eines der zentralen Kriterien für die Bestimmung der Parameter der Systemkalibrierung dar. Das grundlegende Prinzip ist, dass eine Änderung der jeweiligen Parameters eine möglichst signifikante Verschiebung der erfassten Punkte induziert wird. Aufgrund der einfacheren Realisierung und Darstellung wird dies hier am Beispiel von RE näher erläutert. In der Abbildung 4.4 sind zur grafischen Erläuterung exemplarisch fünf RE dargestellt.



Abbildung 4.4: Sensitivitäten der einzelnen DoF in Bezug zu unterschiedliche angeordneter Referenzebenen.

Des Weiteren erfolgt die Darstellung der Koordinatenachsen des lokalen Koordiantensystem s eines terrestrischen Laserscanners. Die Achsen sind entsprechen in den Farben rot (X - Achse), grün (Y - Achse) und blau (Z - Achse) eingefärbt. Der Laserscanner erfasst die RE im Profilmodus (Y, Z - Ebene). Die Änderungen der entsprechenden Parameter aus Gleichung 4.1 wirken im Falle der Translationen vollständig in Richtung der Koordinatenachsen. Eine Änderung der Rotationen bewirkt ein Herausdrehen der gemessenen Punkte. Die Ebenen #2 und #6 wurden rechtwinklig zur Y, Z - Ebene angebracht. Sie sind daher entsprechend hoch sensitiv auf Veränderungen in den Translationen $t_Y|_s^b$ und $t_Z|_s^b$. Für eine optimale Bestimmung von $t_X|_s^b$ müsste eine RE parallel zur Y, Z - Ebene orientiert werden. Da in diese auch das Profil darstellt, in welcher die Laserscanner misst, muss die RE unterschiedlich orientiert werden. In der Abbildung ist daher die RE #11 um $> 20^{\circ}$ zur Y, Z - Ebene gedreht. Der minimal mögliche Verdrehung der RE zur Y, Z - Ebene, ist dabei von der Streckenmess-Charakteristik des verwendeten Aufnahmesensors abhängig. Ein flacherer Auftreffwinkel als $< 20^{\circ}$ am Objekt ist jedoch nicht zu empfehlen, da es in diesem Fall zu systematischen Abweichungen bei der Streckenmessung kommt. Des Weiteren ist die RE #11sensitiv bzgl. der Rotation $\kappa|_s^b$, welche um die Z – Achse erfolgt. Analog verhält es sich mit den RE #5 (sensitiv für $\varphi|_s^b$) und #8 (sensitiv $\omega|_s^b$). Auch hier wird die Verdrehung der RE mit < 20° angegeben. Zum besseren Verständnis, wurde die Sensitivität für jeden Parameter einzeln anhand einer RE erläutert. Es ist jedoch anzumerken, dass die hier dargestellten RE bzgl. mehrerer Parameter sensitiv sein können. Entscheidend dabei ist, wie stark die Änderungen in den Parametern zu einer Verschiebung der Punkte in Bezug zur RE beitragen.

Aus diesen Darlegungen kann auf eine minimale Anzahl von RE geschlussfolgert werden. Es sollten mindestens drei RE verwendet werden. Eine sollte dabei parallel zur X, Y - Ebene (#6), sowie eine

weitere parallel zur X, Z - Ebene (#2) ausgerichtet werden. Hieraus ergeben sich die Translationen $t_Y|_s^b$ und $t_Z|_s^b$ sowie alle gesuchten Rotationen $(\omega, \varphi, \kappa)|_s^b$. Des Weiteren ist eine RE zu verwenden, welche zur Y, Z - Ebene geneigt ist. In der Abbildung 4.4, entspricht das der RE #11. Hierdurch können die Translation $t_X|_s^b$ und die Rotation $\kappa|_s^b$ bestimmt werden. Die Verwendung der erwähnten fünf RE stellt jedoch nur eine Minimallösung dar. Um die Genauigkeiten bei der Parameterbestimmung zu steigern, um auftretende systematische Abweichungen zu minimieren und eine bessere Redundanz zu schaffen, sollte die Anzahl der RE bzw. RG erhöht werden. Wie dies im speziellen Fall aussieht, wird im Abschnitt 4.3.4 beschrieben.

4.3.2 Theoretische Vorbetrachtungen

Für die spätere Prozessierung ist es von erheblichen Vorteil, wenn die RG in einem übergeordneten Referenzkoordinatensystem r vorliegen, da dadurch alle RG einheitlich betrachtet werden können und keine weiteren Transformationen erfolgen müssen. Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass hierdurch der Bezug zum Body-frame b des k-TLS-basierten MSS einfach und schnell realisierbar ist. Je nach Verfahren und verwendeter Sensorik, kann bei der Bestimmung der RG ein entsprechendes Genauigkeitsniveau erreicht werden. Liegt eine dauerhafte Realisierung vor, können auch auftretende Veränderungen an der RG-basierten Realisierung detektiert werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine physische Trennung der Realisierungen von r und den RG. Ein Beispiel für eine praktische Umsetzung ist im Abschnitt 4.4.1 beschrieben.

Einen weiteren Aspekt stellt die Variation der Entfernungen zwischen den einzelnen RG und dem verwendeten Objekt-erfassenden Sensor dar. In der Theorie sollten diese so gewählt werden, dass diese der späteren minimalen und maximalen Messentfernung bei der Objektaufnahme entspricht. Eine Begründung dafür ist, dass sich die zu bestimmenden Translationen und Rotationen gegenseitig stützen sollen. Eine kleine Änderung in den Rotationen $\Delta \omega, \varphi, \kappa$ wirkt sich bei einer minimalen Messentfernung D_{min} geringer auf die Bestimmung der Translationen $\Delta_{min} t_{X,Y,Z}$ als im Falle der maximalen Messentfernung D_{max} aus. Hier findet mit $\Delta_{max} t_{X,Y,Z}$ eine deutlich größere Änderung seitens der Translationen statt, siehe obere Darstellung in der Abbildung 4.5. Umgekehrt wirkt eine Änderung in den Translationen $\Delta t_{X,Y,Z}$ sich im Falle von D_{max} geringer auf die Bestimmung der Rotationen aus als bei D_{min} . Es gilt $\Delta_{min} \omega, \varphi, \kappa < \Delta_{max} \omega, \varphi, \kappa$, siehe untere Darstellung der Abbildung 4.5. Für die praktische Messung ist zu beachten, dass der Messbereich dem der Systemkalibrierung entsprechen sollte. Liegen die Zielweiten außerhalb des Bereiches so treten zusätzliche Unsicherheiten auf, welche nicht durch das konkret bestimmte Modell (6 DoF) abgedeckt sind.



Abbildung 4.5: Darstellung des wechselseitigen Einflusses zwischen Translationen und Rotationen bei der Systemkalibrierung.

Einen weiteren bei der Anordnung und Ausrichtung der RG zu beachtenden Aspekt stellt der Auftreffwinkel des Laserstrahls dar. Wie z. B. in (Soudarissanane, 2016, S. 72-75) dargestellt, sollte ein sehr flacher Auftreffwinkel ($\leq 20^{\circ}$) vermieden werden, da hieraus systematische Abweichungen bzw. ein erhöhtes Rauschverhalten resultieren. Auch dieser Aspekt ist bei der Anordnung der RG entsprechend zu beachten. Dies wurde bereits im Rahmen der Darstellungen zur Sensitivität bezüglich der Bestimmung der Parameter bei der Systemkalibrierung erwähnt, siehe Abschnitt 4.3.1. Als ein konkreter Fall sind hier die in der Abbildung 4.4 dargestellten (RE #5, 8 und 11) zu nennen. In diesen Fällen wurde die Orientierung so gewählt, dass ein minimaler Auftreffwinkel von $\leq 20^{\circ}$ nicht unterschritten wird.

Einen weiteren Punkt stellt die geometrische Anordnung der RG dar. Ist diese möglichst symmetrisch, so können die Auswirkungen von systematischen Abweichungen minimiert werden. Im günstigsten Fall wirken sich diese betragsmäßig entgegengesetzt aus und eliminieren sich dadurch. Als ein konkretes Beispiel ist eine konstante Abweichung bei der Streckenmessung zu nennen. Darüber hinaus ist bei den RG auf geeignete Materialien zu achten. Je nach verwendeten Sensor und Oberflächencharakter, kann es zu bestimmten systematischen Abweichungen kommen. Im Falle von TLS sind hier beispielhaft zu nennen:

- Eindringen des Laserstrahls in das Material (z. B. bei Styropor),
- starke Absorption des Laserstrahls bei dunklen Flächen sowie im Gegensatz dazu
- Überstrahlungseffekte bei stark spiegelnden Flächen, wie z. B. Aluminium.

Wie im Abschnitt 4.3.2 beschrieben, ist eine unterschiedliche Anordnung der RG von besonderer Relevanz. Hierdurch wird sichergestellt, dass bei der Bestimmung der einzelnen Parameter bei der Systemkalibrierung entsprechend sensitive RG verwendet werden. Aus der RG-Konstellation resultiert, dass es zu einer unterschiedlichen Anzahl der Beobachtungen pro RG kommen kann. Dies führt in der Ausgleichung dazu, dass einige RG einen größeren Einfluss auf die Parameterbestimmung haben. Um dies zu vermeiden und eine möglichst gleichmäßige Konstellation der Beobachtungen zu gewährleisten, bietet sich eine Selektion an. Ein weiterer Vorteil, welcher sich hieraus ergibt, ist eine effizientere rechentechnische Handhabung im Rahmen der Prozessierung der Ausgleichung. Eine Möglichkeit der Selektion ist eine zufällig Auswahl. Hierbei besteht der Vorteil, dass sich räumliche Korrelationen, welche bei benachbarten Punkten verstärkt auftreten können, minimiert werden. Eine weitere Dekorrelation der Parameter, kann durch mehrere unterschiedliche Aufstellungen des Sensors im Bezug zu den einzelnen RG erreicht werden (Heinz, 2021) und (Ernst u. a., 2022). Hierdurch wird zusätzlich eine bessere Bestimmbarkeit der Parameter sichergestellt, da größere Distanzunterschiede in der gleichen Klalibrierumgebung realisiert werden können.

4.3.3 Implementierung einer Simulationsumgebung

In diesem Abschnitt wird die Implementierung einer Simulationsumgebung beschrieben. Primäre Zielstellung ist es die Bestimmung der 6 DoF $|_{s}^{b}$ zwischen dem lokalen Koordinatensystem des Laserscanners (s) und dem Body-frame (b) zu optimieren. Hierbei sollen die im Abschnitt 2.7 benannten Genauigkeitsvorgaben eingehalten werden. Zu diesem Zweck wurde eine MCS nach dem *Closed Loop-Prinzip* implementiert. Für eine detaillierte Darstellung wird auf Dorndorf (2014) verwiesen. Der Ablauf der Umsetzung ist in der Abbildung 4.6 dargestellt. Der funktionale Zusammenhang $f(x_i)$ ergibt sich aus dem im Abschnitt 4.2 beschriebenen RG-basierten Ansatz. Als objekterfassender Sensor wird ein Laserscanner (Z+F IMAGER 5010) und als referenzierender Sensor ein Lasertracker (Leica AT960) in Verbindung mit einer T-Probe angenommen. Deren Messunsicherheiten werden mit in die Betrachtung einbezogen und bilden die Grundlage für die Ermittelung der resultierenden Standardunsicherheiten der 6 DoF $|_{s}^{b}$.

In einem ersten Schritt werden einige grundlegende Simulationsparameter definiert. Hierzu gehören die 6 DoF $|_{s}^{b}$ einer vorab durchgeführten Systemkalibrierung, welche hier als wahre Werte



Abbildung 4.6: Ablaufschema der Monte-Carlo-Simulation zur Optimierung der Referenzgeometrien, eigene Darstellung nach Dorndorf (2014).

 $(\tilde{t}_X, \tilde{t}_Y, \tilde{t}_Z, \tilde{\omega}, \tilde{\varphi}, \tilde{\kappa})|_s^b$ eingeführt werden. Hierdurch ist es möglich, die Auswirkung von systematischen Abweichungen zu untersuchen. Hierzu zählt beispielsweise der Einfluss Δ_β , welcher aus dem Auftreffwinkel β zwischen Objekt und Laserstrahl resultiert. Daher wird dieser im Rahmen der MCS mit betrachtet. Als Modell wird der in Bureick (2008, S. 28) vorgestellte Zusammenhang

$$\Delta_{\beta} = 0,0014 \cdot \beta^2 - 0,2504 \cdot \beta + 11,4138 \tag{4.16}$$

verwendet. Hierbei ist anzumerken, dass auch weitere Ansätze, welche die Auswirkung des Auftreffwinkels beschreiben, existieren. Hier ist zum Teil eine deutlich komplexere Herangehensweise festzustellen. Beispielhaft sei dabei auf Soudarissanane (2016) verwiesen. Im Fokus der hier erfolgten Simulation stehen jedoch vorrangig die Auswirkungen einer systematischen Abweichung des Auftreffwinkels auf die Bestimmung der 6 DoF $|_{s}^{b}$.

Des Weiteren werden für die RG und die verwendeten Sensoren (Laserscanner und Lasertracker) die Position und Orientierung im übergeordneten Referenzkoordinatensystem r vorgegeben. Hierbei fließen die Vorüberlegungen der Abschnitte 4.3.1 und 4.3.2 mit ein. Hierzu gehören eine

- Symmetrische Anordnung der RG,
- zentrische Aufstellung des Laserscanners (Minimierung systematischer Effekte),
- Begrenzung eines minimalen Auftreffwinkels zwischen Laserstrahl und RG und
- Begrenzung der Anzahl der Laserscannerbeobachtungen pro RG.

In dieser Simulation werden die RG als deterministisch eingeführt. Dies entspricht der Vorgehensweise bei der späteren praktischen Umsetzung, wo zur Einmessung der RG ein Lasertracker (Leica AT960) verwendet wird, vergleiche Abschnitt 4.4. Hieraus resultiert im Vergleich zur Laserscannermessung eine um den Faktor zehn höhere Genauigkeit. Für eine komplette Betrachtung müssten für die RG auch Unsicherheitsangaben mit eingeführt werden. Der Fokus der hier implementierten Umsetzung liegt auf den Schritten Objekterfassung (durch den Laserscanner) und der 6 DoF-Georeferenzierung (durch den Lasertracker). Es wird untersucht, wie sich deren zufällige bzw. systematische Messunsicherheiten auf die Bestimmung der Parameter auswirken.

Aus der Lage und Anordnung zwischen den Sensoren und den RG ergeben sich die einzelnen Messgrößen. Die Lage der T-Probe bzw. des Body-frames (b) ergibt sich mit Hilfe der vorab bestimmten 6 DoF $|_{s}^{b}$. Zur Vereinfachung wird bei dieser Umsetzung das übergeordnete Referenzkoordinatensystem r in den Ursprung des Lasertrackers gelegt. Dadurch entfällt die in der Gleichung 2.4 dargestellte Transformation. Das bedeutet, dass sich die 6 DoF $|_{b}^{r}$ direkt aus den Messungen zwischen dem Lasertracker und der T-Probe ergeben. Bei den Messungen des Laserscanners wird zur Vereinfachung ein 2D-Modus angenommen. Die daraus resultierenden Messelemente sind die Distanz Dund der Vertikalwinkel v. Analog, wie in der späteren Umsetzung, wird eine konstante Anzahl von 100 gleichmäßig verteilten Punkte pro RG verwendet. Beträgt die Größe der RG 0,25 m, resultiert daraus ein Punktabstand von 2,5 mm. In diesem Fall wäre jedoch bei der praktischen Umsetzung zu beachten, dass es zu räumlichen Korrelationen zwischen den Punkten kommt. Für den Z+F IMAGER 5010 werden ein Durchmesser des Laserspots von 3,5 mm@1m und eine Strahldivergenz von 0,3 mrad angegeben (Z+F, 2010). Um die räumlichen als auch zeitlichen Korrelationen gering zu halten, werden bei der späteren Umsetzung mehrere Profile erfasst. Aus diesen wird im Anschluss eine Anzahl von 100 zufällig ausgewählten Punkten pro RG selektiert. Daher werden im Rahmen der MCS zur Vereinfachung des stochastischen Modells keine Korrelationen eingeführt. Die Messunsicherheiten der verwendenden Sensoren, dies sind der Laserscanner (hier (Z+F IMAGER 5010) für die Objekterfassung und der Lasertracker (Leica AT960 mit T-Probe) für die 6 DoF-Georeferenzierung werden mit betrachtet. Die Angaben für den Z+F IMAGER 5010 sind in den

Tabellen 2.3 und 2.4 bzw. die des Leica AT960 in der Tabelle 2.7 zusammengestellt. Beim Z+F IMAGER 5010 wird eine Unsicherheit für den Vertikalwinkel von $u_v = 0,007^{\circ}$ (spezifiziert als RMS) angenommen. Für die Distanz D wird eine kombinierte Unsicherheit u_{D_c} , welche sich aus angegebenen Linearitätsfehler $u_{D_{linear}} = 1$ mm und dem Distanzrauschen $u_D = 0,3$ mm (spezifiziert als $1\sigma@10$ m für 80% weiß) nach Gleichung 3.26 ergibt. Da für die Messung zwischen Leica AT960 und T-Probe nur eine Gesamtgenauigkeit für die Position (spezifiziert als MPE) angegeben ist, werden für die 6 DoF $|_b^r$ die folgenden Werte eingeführt $u_{t_X,t_Y,t_Z} = 10$ µm und $u_{\omega,\varphi,\kappa} = 0,001^{\circ}$. Die Werte werden für die hier vorliegenden Messbedingungen als realistischer eingeschätzt. Sie werden als Standardabweichung (1σ) spezifiziert. Für die hier eingeführten Standardunsicherheiten wird die Normalverteilung angenommen, vergleiche Gleichung 3.16. Korrelationen werden aufgrund fehlender Kenntnisse und Angaben nicht eingeführt. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass hierdurch die Unsicherheiten der geschätzten Parameter in der VKM zu optimistisch sind.

Im Rahmen der MCS werden die Messungen des Laserscanners $(D, v)|_s$ und der Messungen zwischen Lasertracker und T-Probe (6 DoF $|_b^r$) verrauscht. In der Literatur wird um gute Simulationsergebnisse zu erhalten, eine Anzahl von 100.000 Werten vorgeschlagen, siehe Heunecke u. a. (2013, S. 142). Um die Rechenzeit zu reduzieren, wird im Rahmen dieser Arbeit die Anzahl der Stichproben auf M = 5000 begrenzt. Diese Anzahl wird auch in Dorndorf (2014) verwendet. Hier wird die MCS zehn Mal wiederholt. Da nur geringe Variationen (Translationen $\leq 0,003$ mm und Rotationen $\leq 0,246$ mgon) zwischen den einzelnen Schätzungen der 6 DoF und deren Standardabweichungen auftreten, wird diese Anzahl als ausreichend bewertet. Für Details sei auf Dorndorf (2014, S. 50-52) verwiesen. Die Bestimmung der Zufallszahlen erfolgt nach Gleichung 3.37. Als Ergebnis ergeben sich die Mittelwerte $\hat{E}(y)$ und die Standardabweichungen $\hat{s}(y)$ für die 6 DoF $|_s^b$. Hierüber kann auch der Einfluss bzw. die Auswirkung einer Änderung der Anordnung der RG bstimmt werden. Dies wird im nächsten Abschnitt 4.3.4 näher beschrieben.

4.3.4 Optimierung der Referenzgeometrieanordnung

Das Thema der Optimierung der Anordnung und Orientierung von RG wird in diesem Abschnitt detaillierter beschrieben. Das Ziel ist die Schaffung einer festen Kalibrieranordnung, welche eine genaue und effiziente Bestimmung der 6 DoF ermöglicht. Grundlage hierfür stellt die im Abschnitt

4.3.3 beschriebene Simulationsumgebung dar. Auch in anderen Arbeiten wurde auf diese Vorgehensweise zurückgegriffen. Zentraler Aspekt ist die Bewertung der Qualität der bestimmten 6 DoF bei der Systemkalibrierung. Die Bewertung erfolgt dabei hinsichtlich der Kriterien Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Sensitivität. Die beiden letztgenannten stellen die Grundlage in den Arbeiten von Dorndorf (2014) und Keller (2015) dar. Abgeleitet wird eine optimierte Konfiguration der RE, wobei neben der Position und Orientierung auch die Anzahl und die Größe untersucht werden. In Heinz u. a. (2020) und Heinz (2021) wird als weiteres Kriterium die Zuverlässigkeit, welche auf einer geodätischen Konfigurationsanalyse basiert, mit in die Simulation eingeführt. Die Optimierung erfolgt dabei durch einen iterativen Anpassungsprozess. Alle der benannten Arbeiten basieren auch auf Expertenwissen. Meist betrifft dies die initiale Konfiguration bzw. werden Bedingungen und Grenzwerte gesetzt. Dies trifft auch auf den in Hartmann u. a. (2019) beschriebenen Ansatz zu. Hier wird für die Optimierung der RE-Konstellation ein heuristisches Verfahren verwendet. Im speziellen wird die in Dorndorf (2014) verwendete MCS in einen GA eingebunden, welcher die Suche nach einem globalen Optimum steuert. Auf diesen Aspekt, wird in späteren Verlauf des Kapitels näher eingegangen.

Im Rahmen der in Dorndorf (2014) durchgeführten MCS konnte nachgewiesen werden, dass eine systematische Abweichung in der Streckenmessung beim Laserscanner die Richtigkeit der 6 DoF beeinflusst. Dies trifft jedoch nur auf die Translation t_Z zu. Der Grund hierfür ist die fehlende Symmetrie der bei der Anordnung der RE, welche bzgl. dieses Parameters sensitiv sind. Im Falle der Translationen t_X und t_Y liegt eine symmetrische Anordnung der RE vor, daher werden diese Parameter nicht beeinflusst. Hierdurch bestätigt sich die Annahme aus dem Abschnitt 4.3.2, dass der Einfluss bei symmetrischer Anordnung minimiert wird. Die berechneten Standardabweichungen sind davon nicht betroffen, siehe Dorndorf (2014, S. 49 f.). Daher ist soweit möglich, wie im Abschnitt ein für diese Problematik geeigneter Messaufbau zu wählen. Für die folgende Betrachtung, werden als RE verwendet. Im weiteren Verlauf soll auf Basis der MCS gezeigt werden, dass auch wie in Strübing und Neumann (2013) beschrieben quadratische Flächen, im Speziellen Zylinder, verwendet werden können.

Neben der elementaren Bedingung, dass die RG so anzuordnen sind, dass sie sich mit dem Profil des Laserscanners schneiden, gibt es noch weitere Vorgaben und Einschränkungen. Aus der Tabelle 2.1, ist ersichtlich, dass einige der Modelle ein eingeschränktes vertikales FoV haben. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Modellen Z+F IMAGER 5010 und 5016 ist dieses mit 320° angegeben. Daraus folgt, dass unter dem Laserscanner (Öffnungswinkel 40°) keine RG angeordnet werden können. Des Weiteren soll bei der späteren Umsetzung der Kalibrierumgebung eine feste Montage der RG an den Wänden bzw. an der Decke des Labores des Geodätisches Institut Hannover (GIH) erfolgen. In diesem Fall, können die Entfernungen zwischen RG und Laserscanner nur über dessen Aufstellung variiert werden. Wird eine zentrische Aufstellung und eine Aufbauhöhe des Laserscanners von 1,5 m angenommen, so ergeben sich zur Decke 3,5 m und jeweils ca. 4 m zur linken und rechten Wand. Weitere Vorgaben für eine initiale RE-Konstellation ergeben sich aus den Vorgaben der Abschnitte 4.3.1 und 4.3.2. Die Abbildung 4.4 zeigt eine minimale Anordnung von führ RE, durch welche sichergestellt wird, dass für jeden der 6 DoF mindestens eine RE mit hoher Sensitivität vorhanden ist. Um systematische Einflüsse zu minimieren, wird jedoch zu einer symmetrische Anordnung übergegangen. Daher erweitert sich die Anzahl der RE entsprechend auf drei pro Seite. Für die RE oberhalb des Laserscanners (RE #5 und 6), vergleiche Abbildung 4.4, können keine RE unterhalb angeordnet werden. Die Konstellation besteht somit aus acht RE. Die geneigten RE werden je um 45° verkippt, die Größe beträgt 0,25x0,25 m. Damit wurde eine MCS, nach der im Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Vorgehensweise, durchgeführt. Die berechneten Abweichungen zu den Sollwerten (Δ) sind in der Tabelle 4.1 und die Standardabweichungen (s) der 6 DoF in der Tabelle 4.2 dargestellt.

Des Weiteren sind in den Tabellen 4.1 und 4.2 die Ergebnisse einer erweiterten Konstellation, welche elf RE umfasst, dargestellt. Hier wurden jeweils eine geneigte RE überhalb des Laserscanners (#7) und jeweils eine pro Seite (#1 und #11) hinzugefügt, vergleiche Abbildung 4.7. Die Neigung der zusätzlichen RE erfolgte entgegengesetzt zu den bereits vorhandenen geneigten RE.

Δ (MCS-Soll)	8 RE	8 RE (Δ_{β})	11 RE	11 RE (Δ_{β})
$t_X \text{ [mm]}$	0,000	-1,417	0.000	0,085
$t_Y \; [mm]$	-0,001	-0,028	0.000	0,003
$t_Z \; [mm]$	-0,001	-0,657	0.000	-0,084
ω [mgon]	0,05	-1,17	-0,01	$0,\!18$
φ [mgon]	-0,02	-56,72	-0,04	4,61
κ [mgon]	0,01	0,19	0,00	-0,57

Tabelle 4.1: Berechnete Abweichungen zu den Sollwerten (Δ) der Systemkalibrierung.

 Tabelle 4.2: Berechnete Standardabweichungen (s) der Systemkalibrierung.

s	8 RE	8 RE (Δ_{β})	11 RE	11 RE (Δ_{β})
$t_X \text{ [mm]}$	0,045	0,055	0,030	0,036
$t_Y \; [\mathrm{mm}]$	$0,\!050$	$0,\!051$	0,039	0,032
$t_Z \; [mm]$	0,065	0,050	0,034	0,038
ω [mgon]	$1,\!64$	$1,\!67$	$1,\!57$	$1,\!55$
φ [mgon]	2,22	2,25	1,49	1,60
κ [mgon]	$1,\!37$	$1,\!58$	1,24	1,24



Abbildung 4.7: Anordnung von Laserscanner und elf RE, bei der MCS. In rot dargestellt die 100 pro RE berechneten Laserscanner-Profilpunkte.

Durch die entgegengesetzte Orientierung der RE wirken einige der systematischen Abweichungen, z. B. bei der Distanzmessung, in unterschiedliche Richtungen und werden daher minimiert. Dies zeigen die Ergebnisse in der Tabelle 4.1. Nach Einführung eines systematischen Einflusses, welcher aus dem Auftreffwinkel resultiert, siehe Gleichung 4.16, zeigen sich unterschiedliche Ergebnisse bei den Konstellationen mit acht bzw. elf RE. Bei acht RE ergeben sich die signifikantesten Abweichungen zu den Sollwerten bei der Rotation um die Y-Achse $\varphi = 56,72$ mgon und bei der Translation $t_X = -1,417$ mm. Wird die Konstellation jedoch auf elf RE erweitert, verringern sich die Abweichungen auf $\varphi = 4,61$ mgon und $t_X = 0,085$ mm. Wird keine systematische Abweichung mit eingeführt, ergeben sich erwartungsgemäß keine Abweichungen zu den Sollwerten, in diesem Fall werden sowohl mit acht als auch mit elf RE richtige Ergebnisse erreicht. Die Verringerung der Standardabweichungen nach Erhöhung auf elf RE ist auf die höhere Redundanz zurückzuführen, vergleiche Tabelle 4.2. Des Weiteren ist erkenntlich, dass die Standardabweichungen, nicht durch die eingeführte systematische Abweichung beeinflusst werden. Die Auswirkung betrifft also ausschließlich die Parameter.

Darüber hinaus wird auf Basis der implementierten MCS nachgewiesen, dass wie ursprünglich in Strübing und Neumann (2013) beschrieben, auch quadratische Flächen für die Systemkalibrierung verwendet werden können. Beispielhaft kommen hierfür Zylinder als RG zum Einsatz. Analog wie bei der RE werden die 6 DoF im Rahmen eines GHM bestimmt. Als Abstandsfunktion ergibt sich nach Gleichung 4.10. Die benötigten beschreibenden Parameter $(a_1 \cdots a_{10})$ ergeben sich nach der im Abschnitt 3.4.4 beschriebenen Vorgehensweise. Da Zylinder eine unterschiedliche Geometrie als RE besitzen, ergeben sich bzgl. der Betrachtung der Sensitivität zu 6 DoF einige neue Möglichkeiten. Diese wirken sich auf die Anzahl, Anordnung und Orientierung der Zylinder aus. Als Schnittmenge zwischen einem Zylinder und dem Laserscannerprofil resultiert eine Ellipse bzw. eine Kreis. Es ist jedoch anzumerken, dass sich die Betrachtung nur auf dem vom Laserscanner sichtbaren Bereich bezieht (halbe Ellipse bzw. Halbkreis). Hieraus ist erkenntlich, dass ein Zylinder bei entsprechender Anordnung und Orientierung zur mehreren Parametern der 6 DoF sensitiv ist. Somit kann die Anzahl reduziert werden. Unter der Vorgabe einer zentrischen Aufstellung des Laserscanners und Betrachtung der symmetrischen Anordnung wird eine initiale Konstellation von sechs Zylindern, siehe Abbildung 4.8, in die MCS eingeführt. Die Länge der Zylinder beträgt 0,5 m und der Durchmesser von 0,25 m. Die Ergebnisse der MCS mit den verwendeten sechs Zylindern sind in der Tabelle 4.3 dargestellt. Diese zeigen, dass eine Bestimmung der 6 DoF basierend auf qua-

Δ (MCS	-Soll)	8	
$t_X \text{ [mm]}$	-0,001	$t_X [\mathrm{mm}]$	0,038
$t_Y \text{ [mm]}$	0,000	$t_Y \text{ [mm]}$	$0,\!045$
$t_Z \; [mm]$	0,000	$t_Z \; [mm]$	0,039
ω [mgon]	0,00	ω [mgon]	$1,\!80$
φ [mgon]	-0,03	φ [mgon]	$1,\!32$
κ [mgon]	0,00	κ [mgon]	$1,\!32$

Tabelle 4.3: Ergebnisse der MCS für eine Systemkalibrierung basierend auf Zylindern, berechnete Abweichungen zu den Sollwerten (Δ) und Standardabweichungen (s).

dratischen Flächen, hier am Beispiel von Zylindern, möglich ist. Es zeigen sich ähnliche Ergebnisse, welche auf Basis der RE ermittelt wurden, vergleiche Tabellen 4.1 und 4.2. Auf eine Modellierung einer systematischen Abweichung, welche aus dem Auftreffwinkel Δ_{β} resultiert, soll an dieser Stelle verzichtet werden. Eine detailliertere Betrachtung zu dieser Thematik wäre jedoch anzustreben, da der Auftreffwinkel in den Randbereichen der Schnittellipse bzw. des Schnittkreises flacher wird. Hier wäre näher zu untersuchen, in wie weit eine Begrenzung des Ausschnittes vom sichtbaren Teil zu begrenzen ist, um einen flachen Auftreffwinkel zu vermeiden. Zusammenfassend sind die Ergebnisse als positiv zu bewerten. Daher sollte bei zukünftigen Betrachtungen, untersucht werden, in wie weit eine kombinierte Verwendung von RE und quadratischen Flächen, wie z. B. Zylindern sinnvoll ist. Die Erkenntnisse und Ergebnisse der durchgeführten MCS zeigen, dass hierdurch der Arbeitsaufwand vermindert und gleichzeitig die Qualität der Systemkalibrierung gesteigert werden kann.



Abbildung 4.8: Anordnung von Laserscanner und sechs Zylindern, bei der MCS. Des Weiteren sind die berechneten 100 Schnittpunkte pro RE und dem Laserscanner-Profil dargestellt.

Aspekte einer automatisierten Optimierung

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass die Bestimmung der optimalen RG-Konstellation (Anordnung und Orientierung) eine komplexe Fragestellung darstellt, welches ein hohes Maß an Expertenwissen erfordert. Um auch Nicht-Experten eine Durchführung zu ermöglichen, ist der Prozess zu vereinfachen bzw. zu automatisieren. Eine endgültige Vorgehensweise bzw. eine komplette Lösung, welche eine Black-Box Charakter besitzt, wird jedoch schwer umzusetzen sein. Der Optimierungsprozess, wird sich immer an die Vorgaben des Einzelfalls orientieren müssen. Hierzu gehören die folgenden wesentlichen Aspekte:

- die örtliche Bedingungen,
- das eingesetzte Instrumentarium und
- die Anforderungen der späteren Anwendung, wie z. B. Genauigkeitsvorgaben.

Daraus sind im Regelfall Randbedingungen abzuleiten. Hierdurch wird der Suchraum für die eingeschränkt. Hierzu gehören z.B.:

- die Beachtung des Messbereichs der eingesetzten Sensorik,
- die Vorgabe, dass sich die RG und das Profil des Laserscanners schneiden und
- das für den minimalen Auftreffwinkel zwischen RG und Laserstrahl ein Schwellwert definiert wird.

Hieraus ist erkenntlich, dass die Anzahl der möglichen Lösungen eingegrenzt wird. Trotzdem erscheint ein automatisiertes systematisches Testen, wird auch als Brute Force (BF)-Methode bezeichnet, zur Lösung des Problems unrealistisch. Das dies mit einem sehr hohen Rechenaufwand verbunden ist, wird in Hartmann u. a. (2019) anhand eines konkreten Beispiel gezeigt. Grundlage hierfür ist die später auch im Rahmen dieser Arbeit verwendete Laborumgebung des GIH. In die Betrachtung werden acht der elf in der Abbildung 4.7 dargestellten RE verwendet. Um die Rechenzeit zu verringern, wird auf die RE # 3, 7 und 9 verzichtet. Eine Darstellung der RE-Konstellation und der gesuchten Parameter erfolgt in der Abbildung 4.9.



Abbildung 4.9: Darstellung der gesuchten Größen und des Aufbaus für die automatisierte Optimierung der RE mit Hilfe eines GA. Abgeänderte Darstellung aus Hartmann u. a. (2019).

Des Weiteren wird von einer horizontalen Aufstellung des Laserscanners ausgegangen. Darüber hinaus erfolgt keine Verschiebung der RE in die X-Richtung des Laserscannerkoordinatensystem (s). Damit verbleiben als gesuchte Größen für die Anordnung der RE die Translationen in Y- und in Z-Richtung (y_1 und z_1). Die gesuchten Rotationen der RE um die Achsen des lokalen Koordinatensystems des Laserscanners (s), werden mit α_1, β_1 und γ_1 bezeichnet. Die Begrenzung und Schrittweite für die Suche resultieren aus Vorgaben, welcher sich aus einem minimalen Auftreffwinkel zwischen Laserstrahl und RE, dem typischen Messbereich des verwendeten k-TLS-basierten MSS und der später genutzten Laborumgebung des GIH ergeben. Für Details sei hier auf Hartmann u. a. (2019) verwiesen. Die verwendete Werte sind in der Tabelle A.3 im Anhang dargestellt.

Wird eine Optimierung aller Parameter $y_1, z_1, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ angestrebt, so ergibt sich insgesamt eine Anzahl von 448875 Möglichkeiten. Im Falle der Verwendung von BF und der Annahme das eine Lösung 35 s benötigt, resultiert eine Berechnungszeit von 4364 Stunden (Hartmann u. a., 2019). Dies zeigt, dass eine alternative Vorgehensweise zu wählen ist. Daher schlagen Hartmann u. a. (2019) die Verwendung eines heuristischen Verfahrens vor. Kernstück bildet die im Abschnitt 4.3.3 vorgestellte Optimierung (Sensitivitätsanalyse), welche auf einer MCS basiert. Diese wird in einen GA eingebettet. Ein GA gehört zu der Gruppe der evolutionären Algorithmen, die auf dem Prinzip der biologischen Evolution Darwins ("survival of the fittest") basieren. Für eine detaillierte Darstellung zum Thema GA wird hier jedoch auf die Grundlagenliteratur verwiesen, exemplarisch sind Goldberg (1989), Weicker (2002) und Boersch (2007) zu nennen. Der GA übernimmt die Steuerung bei der Suche nach der optimalen RE Konstellation. Einen Überblick des Ablaufs gibt die Abbildung 4.10.



Abbildung 4.10: Ablaufes der automatisierten Optimierung einer RE am Beispiel der Rotation κ (Schild, 2018).

Für eine detailliertere Beschreibung der durchgeführten Optimierung der RE-Konstellation wird auf Hartmann u. a. (2019) verwiesen. Die Qualität der Lösung wird durch den Fitnesswert repräsentiert. Dieser ergibt sich durch eine problemspezifische Bewertungsfunktion, welche auch als Fitnessfunktion f bezeichnet wird. Im Falle der durchgeführten Optimierungen werden drei Fitnessfunktionen definiert, welche die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse bestimmten Varianzen der 6 DoF verwenden. Diese werden als Helmertscher 3D-Punktfehler zusammengefasst. In f_1 werden ausschließlich die Varianzen der Translationen und in f_2 die der Rotationen verwendet. Bei f_2 wird durch Multiplikation mit der Distanz D ein metrisches Maß erhalten. In der Fitnessfunktion f_3 werden die Effekte von f_1 und f_2 zusammengeführt. Es gilt

$$f_1:\sigma_{trans} = \sqrt{(\sigma_{t_x}^2 + \sigma_{t_y}^2 + \sigma_{t_z}^2)|_s^b},\tag{4.17}$$

$$f_2: \sigma_{rot,D} = D \cdot \sqrt{(\sigma_\omega^2 + \sigma_\varphi^2 + \sigma_\kappa^2)|_s^b} \quad \text{und}$$

$$\tag{4.18}$$

$$f_3:\sigma_{trans,rot,D} = \sqrt{\sigma_{trans}^2 + \sigma_{rot,D}^2}.$$
(4.19)

Mit allen drei Fitnessfunktionen werden Optimierungsdurchläufe durchgeführt. Die Zeitdauer hierfür beträgt je 7:48 Stunden (Hartmann u.a., 2019). Hieraus ist ersichtlich, dass eine deutliche Verringerung der Zeitdauer im Vergleich zu BF-Methode (4364 Stunden) erreicht wird.

Um die Wiederholbarkeit zu untersuchen bzw. zu bestimmen, erfolgten für alle Fitnessfunktionen jeweils insgesamt mindestens drei Durchläufe. Im Falle von f_3 wurde die Anzahl auf zehn Durchläufe erhöht. In der Tabelle A.5 sind die Ergebnisse der einzelnen Optimierungsdurchläufe nach Parametern und entsprechender Fitnessfunktionen aufgelistet. Bei Betrachtung der Fitnesswerte fällt auf, dass diese bei Verwendung von f_1 um den Faktor 20 kleiner sind als bei f_2 . Des Weiteren

ist festzustellen, dass bei f_3 ähnliche Fitnesswerte wie im Falle von f_2 erreicht werden. Dies lässt schlussfolgern, dass im Falle der kombinierten Betrachtung f_3 die Rotationen dominieren. Im Falle von f_2 und f_3 wird die Distanz D zwischen dem Laserscanner und der RE mit betrachtet, vergleiche Gleichung 4.17 und 4.19.

An dieser Stelle erfolgt nur eine kurze Beschreibung und Interpretation der Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen. Für weitere Details wird auf Hartmann u.a. (2019) verwiesen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle A.5 dargestellt. Aus den Ergebnissen ist erkenntlich, dass mit Ausnahme des sechsten Durchlaufes mit f_3 keine wesentlichen Unterschiede bei den Parametern und bei den Fitnesswerten bestehen. Die Ergebnisse zeigen das die im Abschnitt 4.3.2 formulierten theoretischen Ansätze zum Teil bestätigt werden. Hier wurde dargelegt, dass sich die Abweichungen in den Translationen auf kurzen und die der Rotationen auf langen Distanzen signifikanter auswirken bzw. sich diese im Umkehrschluss gegenseitig stützen. Die geometrischen Zusammenhänge hierfür werden in der Abbildung 4.5 dargestellt. Im Falle der Fitnessfunktion f_1 (Translationen) wird beim Parameter y_1 die minimale Grenze von 1 m erreicht. Bei f_2 (Rotationen) und f_3 (Kombination) sind es je ca. 8 m, was eine Tendenz zum Maximum des Suchbereiches (10 m) bedeutet. Bei den Parametern α_1, β_1 und γ_1 (Drehungen um die X-,Y- und Z-Achse des Laserscanners) werden bei f_2 und f_3 die minimal möglichen Grenzen (im Sinne eines flachen Auftreffwinkel) erreicht. Hieraus ergibt sich eine hohe Sensitivität hinsichtlich der Rotationen. Im Falle von f_1 weicht das Ergebnis für α_1 ab. Hier werden 60° erreicht, was vom minimal möglichen Wert (20°) abweicht. Dies entspricht jedoch der Theorie, da in diesem Falle nach den Varianzen der Translationen optimiert wird. Im Fall der Ergebnisse bei der vertikalen Komponente z_1 bestätigt sich die Theorie nicht. Es werden bei f_1 4 m und bei f_2 bzw. f_3 2,5 m erreicht. Hier sollte sich eine kürzere vertikale Verschiebung im Falle von f_1 und eine längere bei f_2 bzw. f_3 ergeben. Dies sollte zukünftig nochmals näher untersucht werden. Einer der Gründe hierfür könnte darin bestehen, dass für das vertikale Suchfeld keine symmetrische RE-Anordnung eingeführt wurde, vergleiche Tabelle A.4. Der Grund hierfür ist die spätere Umsetzung, bei welcher keine Anordnung von RE unterhalb des Laserscanners erfolgt.

Resümee und Ausblick

Aus den vorhergehenden Abschnitten ist zu entnehmen, dass der Anordnung und Orientierung der RG eine besondere Bedeutung zukommt. Dies zeigen die dargestellten Ergebnisse und Analysen zum Thema Optimierung. Hierbei fließen einige theoretische Aspekte (vergleiche Abschnitt 4.3.2) und messtechnische Vorgaben (4.3.4) in die Konstellation der RG ein. Aufgrund ihrer einfachen Handhabung und Beschreibung werden RE verwendet. Die Optimierung der RE erfolgt mit Hilfe einer MCS, siehe Abschnitt 4.3.3. Eines der wesentlichsten Aspekte stellt die Sensitivität der RE dar, vergleiche Abschnitt 4.3.1. Die durchgeführten Untersuchungen erfolgen mit einer Konstellation von acht RE. Darüber hinaus wird im Rahmen der MCS die Auswirkung von systematischen Abweichungen untersucht. Beispielhaft erfolgt dies durch eine Systematik, welche sich aus dem Auftreffwinkel beim Laserscanning ergibt. Die Ergebnisse der Tabelle 4.1 zeigen, dass die Parameter in ihrer Richtigkeit durch die eingeführte Systematik beeinflusst werden. Die Konstellation der RE wird daher auf elf zum Teil symmetrisch angeordnete RE erweitert, vergleiche Abbildung 4.7. Hierdurch kann der Effekt der Systematik deutlich verringert werden. Des Weiteren ist erkenntlich, dass die Standardabweichungen durch die Systematik nicht beeinflusst werden, vergleiche Tabelle 4.2. Hinsichtlich systematischer Abweichung ist die Konstellation der RE daher zu überprüfen und entsprechend zu optimieren. Voraussetzung ist jedoch das diese bekannt sind.

Eine Alternative zu RE, stellen quadratische Formen dar. Basierend auf Zylindern erfolgt im Rahmen der implementierten MCS die Bestimmung der gesuchten 6 DoF, vergleiche Gleichung 4.1. Hierbei werden vielversprechende Ergebnisse erreicht. Durch sech unterschiedlich angeordnete und orientierte Zylinder (siehe Abbildung 4.8) werden ähnliche Ergebnisse erreicht, wie im Falle der verwendeten elf RE, vergleiche Tabelle 4.3. Die Anzahl der verwendeten RG kann hierdurch verringert werden. Dies ist als positiver Aspekt zu werden, kann hierdurch der Aufwand bei der Installation und Einmessung verringert werden. Einen weiteren Aspekt stellt die Verwendung einer Mischkonstellation aus RE und Zylindern dar. Hierdurch könnten weitere wichtige Erkenntisse hinsichtlich der Optimierung gewonnen werden. Hierfür wäre der Einfluss von Systematiken bei der Verwendung von Zylindern vorab näher zu untersuchen.

Auch die Erweiterung bzw. Entwicklung hin zu einer automatisierten Suche nach einer optimierten Konstellation von RE, welche mit Hilfe eines GA durchgeführt wird, stellt einen weiteren wichtigen Aspekt dar. Die vorgestellten Ergebnisse im vorherigen Abschnitt stellen dar, dass dies möglich ist. Der wesentliche Vorteil bei dieser Vorgehensweise besteht in der wesentlichen Verkürzung im Vergleich zu einer mit BF durchgeführten Suche. Kernpunkt stellt die Formulierung der Fitnessfunktion dar. Für die durchgeführten Untersuchungen wurden die ermittelten Varianzen der bestimmten 6 DoF verwendet, vergleiche Gleichungen 4.17 - 4.19. Es ist jedoch anzumerken das durch Verwendung der Varianz nicht alle Aspekte bei der Bewertung der Qualität berücksichtigt werden. Treten systematischen Abweichungen auf, so werden hierdurch die Varianzen nicht beeinflusst, vergleiche Tabelle 4.2. In diesem Fall ist die Richtigkeit mit zu überprüfen. Problematisch hierbei ist, dass hierfür Referenzwerte, welche mit einer höhere Genauigkeit (möglichst um den Faktor 10^{-1}) vorliegen müssen. Eine weitere Möglichkeit die Optimierung zu erweitern, stellt die Analyse auf Basis von Korrelationen dar. Beispielhaft sind hier die Ansätze von Heinz (2021) und Ernst u. a. (2022) zu nennen. Letzterer bezieht auch die Zuverlässigkeit als Qualitätsmerkmal mit in die Analyse ein. Weitere Möglichkeiten stellen eine detailliertere Betrachtung der abschließenden Widersprüche bzw. des Konvergenzverhaltens der Ausgleichung dar.

Abschließend bleibt jedoch zu resümieren, dass eine allgemeingültige Lösung bzw. eine endgültige Konstellation von RG schwer zu finden sein wird. Dies ergibt sich aus der Komplexität der Aufgabe, welche die Bewertung der Qualität schwierig macht. Des Weiteren ist immer zu bedenken, dass sich die Vorgaben der Optimierung aus den Anforderungen der späteren Messung bzw. aus dem Aufbau des verwendeten MSS ergeben. Dies zeigt sich auch an den unterschiedlichen Strategien und Herangehensweisen, welche in den letzten Jahren entwickelt und publiziert wurden.

4.4 Praktische Realisierung und Durchführung

Wie eingangs im Abschnitt 4.1 beschrieben, gibt es bereits einige feste und zum Teil permanente Kalibrierumgebungen. Neben der eingangs erwähnten hohen Genauigkeitsanforderung von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm ist als eine weitere wesentliche Forderung ein möglichst effizienter Ablauf zu nennen. Daher wird auch hier eine feste Anordnung von RG favorisiert und eine entsprechende Umsetzung vorgestellt. Im Anschluss wird die Durchführung der Systemkalibrierung am Beispiel des im Abschnitt 2.7.4 vorgestellten k-TLS-basierten MSS beschrieben. Abschließend werden die Ergebnisse dargestellt, welche abschließend diskutiert und bzgl. der in Abschnitt 1.1 vorgestellten Genauigkeitsanforderung bewertet werden.

4.4.1 Realisierung einer Kalibrierumgebung

Eine der wesentlichen Zielstellungen für die Umsetzung einer festen Kalibrierumgebung ist, dass möglichst viele der theoretischen Aspekte und Inhalte, welche in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 vorgestellt wurden, aufgegriffen werden. Hier werden RE aufgrund ihrer einfachen Handhabung verwendet. Da die Erfassung durch den Laserscanner im Profilmodus erfolgt, werden die RE entsprechend im vertikalen Profil angeordnet, siehe Abbildung 4.11. Wie eingangs des Abschnittes 4.4 erwähnt, ist neben einer möglichst genauen Bestimmung der Parameter eine effiziente Umsetzung der Systemkalibrierung anzustreben. Des Weiteren ergeben sich aufgrund der örtlichen Gegebenheiten einige Restriktionen bzw. Vorgaben, welche bei der Umsetzung zu beachten sind. Die vorgestellte Umsetzung stellt somit einen Kompromiss dar.

Die Ausdehnung des Labors im GIH beträgt ca. 9 m in der Länge und ca. 5 m in der Höhe. Hierdurch wird die Platzierung der RE eingeschränkt. Da eine feste Installation angestrebt wird, werden die Wände bzw. die Decke im Labor verwendet. Auch eine zusätzliche Anordnung von RE



Abbildung 4.11: Darstellung der aus elf RE bestehenden festen Kalibrierumgebung im Labor des GIH. An der hinteren Wand befinden sich die Referenzpunkte (Zielzeichen), welche mit CCR bestückt werden können. Über dies kann die Stationierung des Lasertrackers erfolgen.

auf dem Boden ist möglich, auf eine dauerhafte Installation wird hier jedoch verzichtet, da diese den Laborbetrieb einschränken würde. Eine weitere Einschränkung ergibt sich durch das vertikale FoV (Gesichtsfeld) des verwendeten Laserscannermodells, da hier keine RE platziert werden können. Für die Installation der RE an den Wänden, wurde jeweils pro Seite eine Metallschiene im unteren Wandbereich mit einer maximalen Höhe von 1,5 m über dem Boden installiert. Dadurch wird eine schnelle und einfache Montage bzw. Demontage der RE sichergestellt. Die Anordnung der vertikalen Halterungen erfolgt symmetrisch auf beiden Seiten des Labors. Beide haben eine Länge von ca. 1,3 m. Dadurch ist eine Anordnung von jeweils maximal fünf RE pro Seite möglich. Im konkreten Fall, wurden jeweils vier symmetrisch angeordnete RE auf der linken und rechten Seite montiert. Die RE # 2, 4, 5, 6, 7, 8 und 10 haben eine Größe von 0,25 x 0,25. Im Falle der RE # 1, 3, 9 und 11, wurde bewusst die Größe 0,25 x 0,5 m gewählt. Hierdurch wird auch bei einer stärkeren Neigung zum Profil ein größerer Überlappungsbereich von ca. 0,1 - 0,2 m mit den anderen RE realisiert. Dies hat den Vorteil, dass auch geringfügige seitliche Verschiebungen bzw. eine leichte Verdrehung des Scanprofils kompensiert werden. Des Weiteren wird durch die Schienen eine vertikale Verschiebung im entsprechenden Arbeitsbereich (0 - 1,5 m) ermöglicht. Nach einer erfolgten Feinausrichtung, können die RE fest verschraubt werden. Auch an der Decke wurde eine Schiene mit einer Länge ca. 1 m) mittig vom Profil installiert. An dieser können insgesamt 3 RE montiert werden. Auch in diesem Fall ist eine geringe Verschiebungen in Profilrichtung möglich. Des Weiteren wurden, um eine möglichst hohe Flexibilität bei der Ausrichtung der RE zu haben, Drehgelenke verwendet. Diese ermöglichen eine Rotation um drei Achsen, wodurch ein hoher Freiheitsgrad bei der Ausrichtung der RE sichergestellt wird. Als Material für die RE wurde ALUCORE[®] verwendet. Dies hat den Vorteil, dass es zum einen sehr leicht und zum anderen sehr robust ist. Des Weiteren wird hierdurch eine sehr ebene Oberfläche gewährleistet. Dies zeigen die Werte zur Ebenheit in der Tabelle 4.6. Neben den Vorgaben, welche aus den örtlichen Gegebenheiten und der Montage der RE resultieren, wird bei der Anordnung und Ausrichtung die im Abschnitt 4.3.1 beschriebene Sensitivität aufgegriffen. Durch die dort dargestellten fünf RE, wird sichergestellt, dass für jeden Parameter der Systemkalibrierung mindestens eine RE maximal sensitiv ist. Aus Gründen der Redundanz, wurde die Anzahl bei der hier umgesetzten Kalibrierumgebung auf elf RE erhöht. Einen weiteren Aspekt, stellt die symmetrische Anordnung dar, wodurch systematische Abweichungen möglichst

minimiert bzw. eliminiert werden sollen. Daher erfolgte die Anordnung der RE #1, 2, 3 und 4 spiegelbildlich mit #8, 9, 10 und 11 auf der anderen Seite. Die Ausrichtung der RE #1, 3, 5, 7, 9 und 11 erfolgte mit ca. 45° Neigung zum Profil. Auch wenn in der Optimierung, vergleiche Abschnitt 4.3.3 und Tabelle A.5, eine Verkippung mit bis zu 20° Neigung zum Profil diskutiert wurde, erfolgt hier die Umsetzung mit 45°. Diese Entscheidung wurde auf Grund von Erfahrungswerten getroffen. Im Rahmen von Test hat sich gezeigt, dass bei einem Auftreffwinkel von 20° in Verbindung mit dem verwendeten ALUCORE[®] RE systematische Abweichungen auftreten. Dieser Aspekt ist für die zukünftige Betrachtung mit zu beachten und im Rahmen der Optimierung der RE aufzugreifen. Die Ausrichtung der RE #4 und 8 erfolgt um 45° zur XY-Ebene des Laserscanners. Im Falle der RE # 2, 6 und 10 wurde eine rechtwinklige Ausrichtung zum Profil gewählt.

Neben der Anordnung der RE stellt die Aufstellung und Ausrichtung des Laserscanners einen weiteren wesentlichen Aspekt bei der Systemkalibrierung dar. Während bei der Ausrichtung (Rotation) des Laserscannerprofils darauf zu achten ist, dass alle der verwendeten RE in diesem liegen, ist eine Aufstellung (Translation) theoretisch innerhalb des gesamten Profils möglich. Die einzige Einschränkung ergibt sich dabei lediglich durch die minimale Messdistanz des verwendeten Laserscannermodell. Diese sollte nicht unterschritten werden. Aus Gründen der Symmetrie erfolgt die Aufstellung des Laserscanners in einem mittigen Standpunkt, siehe Abbildung 4.11. Hierdurch wird eine Vielzahl die auftretenden systematischen Abweichungen minimiert. Beispielhaft sind hier die Systematiken bei der Distanzmessung zu nennen. Für die hier durchgeführten Messungen wurde der Laserscanner zentrisch mit einer Kippachshöhe von ca. 1,5 m über dem Boden aufgestellt. Dies führt dazu, dass sich die RE #6 direkt über dem Laserscanner befindet und diese damit optimal sensitiv für die Translation in Richtung der Z-Achse des Laserscanners ist. Der Abstand beträgt hier ca. 3,2 m. Die Abstände zu den seitlichen RE betragen ca. 4,2 m.

4.4.2 Durchführung der Systemkalibrierung

In diesem Abschnitt wird die konkrete Durchführung der Systemkalibrierung am Beispiel des im Abschnitt 2.7.4 vorgestellten k-TLS-basierten MSS beschrieben. Als RG werden RE verwendet.



Abbildung 4.12: Messanordnung von Laserscanner mit T-Probe und Lasertracker bei der Systemkalibrierung.

Deren Anordnung bzw. die der Sensoren, sowie die Lage der einzelnen Koordinatensysteme, werden in der Abbildung 4.12 dargestellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse, welche mit zwei unterschiedlichen Laserscannermodellen, konkret Z+F IMAGER 5010 bzw. 5016 dargestellt. Die unterschiedlichen Parameter bzw. Ergebnisse, sind mit Messung 1 (Z+F IMAGER 5010) und Messung 2 (Z+F IMAGER 5016) gekennzeichnet.

Bestimmung der Referenzebenen im einheitlichen Referenzsystem

Wie im Abschnitt 4.3.2 erwähnt, ist es von Vorteil, wenn alle der RE in einem einheitlichen Referenzkoordinatensystem r vorliegen. Bei der hier vorgestellten Realisierung erfolgt dies durch Einmessung mit einem Lasertracker. Verwendet wird ein Leica AT960, welcher in einem ersten Arbeitsschritt im Referenzsystem r des Labors des GIH stationiert wird. Analog zur im Abschnitt 2.7.3 beschriebenen Vorgehensweise werden hierfür Messungen zu festen Referenzpunkten, welche mit CCR bestückt werden, durchgeführt. Im konkreten Fall sind diese durch die in der Abbildung 2.8 dargestellten magnetischen Nester realisiert. Dies werden gleichmäßig horizontal und vertikal verteilt an den Wänden, auf dem Boden und an der Decke montiert, siehe Abbildung 4.11.

Es wurden jeweils Messungen zu fünf Referenzpunkten durchgeführt. Da hierdurch eine Überbestimmung gegeben ist, ergeben sich Transformationsparameter nach Ausgleichung. Die Ergebnisse der im Rahmen der Messungen 1 und 2 durchgeführten Stationierungen mit dem Leica AT960 im Labor des GIH werden in der Tabelle 4.4 dargestellt.

j							
Messung 1	$(t_X, t_Y, t_Z) _l^r$ [m]	$33,\!5717591$	$13,\!27\overline{23985}$	0,0618870			
Messung 1	$(\omega, \varphi, \kappa) _l^r$ [gon]	399,765093	0,000387	$129,\!353351$			
Mossung 2	$(t_X, t_Y, t_Z) _l^r$ [m]	32,2748399	7,6652886	0,0509531			
Messung 2	$(\omega, \varphi, \kappa) _l^r$ [gon]	399,748792	0,035165	148,621666			

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Stationierung des AT960 über fünf Referenzpunkte im Labor des GIH

Als Maßstabsfaktor wurde eine Wert, welcher nur minimal von $m|_l^r = 1$ abweicht, ermittelt. Daraus folgt, dass sich die für die Transformation gültige allgemeine Gleichung 3.1 zu Gleichung 2.4 vereinfacht. Exemplarisch werden die Restklaffen der Stationierung (Messung 2) in der Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Restklaffen der Stationierung des AT960 über fünf Referenzpunkte im Labor des GIH. Hinweis: da der Ursprung des Referenzkoordinatensystem außerhalb des Labores liegt, weichen die Translationen von den Ausmaßen des Raumes ab.

Pkt.	X [m]	Y [m]	Z [m]	$d_X \; [\mathrm{mm}]$	$d_Y \; [\mathrm{mm}]$	$d_Z \; [\mathrm{mm}]$	$d_{Mag} \; [\mathrm{mm}]$
241	14,5403380	18,8052150	0,9227010	-0,0155	0,0079	0,0144	0,0226
322	16,3462190	10,2916660	3,0753770	-0,1114	$0,\!0967$	-0,0414	0,1532
451	10,0347250	10,0574070	1,5421930	0,1043	-0,0355	0,0134	0,1110
541	10,0087960	17,8519200	1,8883150	0,0784	0,0028	-0,0004	0,0785
909	16,4298460	14,7632810	1,0625130	-0,0558	-0,0718	0,0140	0,0920
	*	*	RMS d	0,0810	0,0563	0,0214	0,1009

An den Restklaffen ist zu erkennen, dass die Stationierung des Leica AT960 mit hoher Genauigkeit erfolgt. Dies zeigt sich am RMS-Wert der Restklaffen von $d_{Mag} = 0,1009$ mm. Hieraus kann zum einen abgeleitet werden, dass die Messungen zu den Referenzpunkten mit der entsprechenden Genauigkeit erfolgten.

Nach der Stationierung des Lasertrackers ist die direkte Erfassung der RE in r möglich. Für die eindeutige Bestimmung von Form und Lage einer RE sind mindestens drei Punkte nötig. Dabei ist darauf zu achten, dass diese nicht auf einer Geraden liegen. Bei der praktischen Durchführung, erfolgten für jede der i = 11 RE eine Anzahl von k = 5 statischen Messungen mit einem Leica AT960 zu einem CCR. Dieser wird an die Oberfläche der RE angehalten. Aus den erfassten polaren Elementen ergeben sich durch Einsetzen in die Gleichung 2.1 die kartesischen Koordinaten

$$\boldsymbol{x}_{kRE_{i}}|_{r} = [X_{k} \ Y_{k} \ Z_{k}]_{RE_{i}}^{T}|_{r}.$$
(4.20)

Die Anordnung der Messpunkte erfolgt dabei analog zu einer Fünf auf einem Spielwürfel. Für die verwendeten RE, welche maximal die Dimension von 0,25 x 0,5 m haben, stellt dies eine ausreichende Art für die Bestimmung der Form und Lage der RE dar. Aufgrund der vorliegenden Überbestimmung ist es somit möglich, dass neben den in der Gleichung 4.2 aufgeführten Ebenenparameter deren Unsicherheiten bzw. die Ebenheit der RE bestimmt werden. In der Tabelle 4.6 werden die Parameter der verwendeten elf RE der in Abbildung 4.11 dargestellten festen Kalibrierumgebung angegeben. Hierbei ist anzumerken, dass die Parameter um den halben Durchmesser des verwendeten CCR (19,05 mm) korrigiert wurden. Des Weiteren werden die RMS-Werte der RE-Schätzung und eine Angabe zur Ebenheit angegeben. Diese beinhalten die Abweichungen, welche aus der Ebenheit der RE sowie die Messung mit dem Lasertracker resultieren.

 Tabelle 4.6:
 Berechnete und um den halben Durchmesser des verwendeten CCR korrigierte Parameter der elf verwendeten RE. Des Weiteren werden die RMS-Werte der Schätzung und die Angabe zur Ebenheit dargestellt.

RE	n_x	n_y	n_z	$d_O [m]$	RMS Fit RE [mm]	Ebenheit [mm]
1	0,871999	0,489459	-0,006849	15,8809128	0,0739	0,1670
2	0,000372	0,999901	0,014068	-10,2375864	0,0458	0,1243
3	-0,714947	$0,\!699179$	0,000614	1,7250612	0,0102	0,0272
4	-0,005281	$0,\!659667$	0,751540	-7,7985168	0,0144	0,0351
5	-0,716735	-0,002745	-0,697340	$12,\!2535187$	0,0187	0,0428
6	0,189461	-0,002700	-0,981885	$0,\!2301634$	0,0238	0,0551
7	0,704116	-0,002732	-0,710079	$5,\!3662007$	0,0104	0,0227
8	0,034370	-0,731233	$0,\!681262$	$12,\!1276805$	0,0420	0,1097
9	-0,716554	-0,697508	-0,005779	21,8642518	$0,\!0504$	0,1393
10	-0,026117	-0,999649	-0,004521	$18,\!9032592$	0,0240	0,0634
11	0,705219	-0,708877	-0,012634	$4,\!3737195$	0,0448	0,1228

Im Rahmen der hier erfolgten Umsetzung werden die Ebenenparameter jedoch nicht als Beobachtungsgrößen eingeführt. Aus Niemeier (2008, S. 4) ist zu entnehmen, dass als wahrer Wert auch ein sehr genau bekannter Wert einer Zufallsvariable verwendet werden kann. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass mindestens eine um den Faktor zehn bessere Messgenauigkeit erreicht wird. Bei der konkreten Umsetzung wird der Leica AT960 verwendet. Für diesen ist im Datenblatt eine Unsicherheit von $U_{xyz} = 15 \ \mu\text{m} + 6 \ \mu\text{m}/\text{m}$ (spezifiziert als MPE) angegeben, vergleiche Tabelle 2.7. Hierdurch ist also eine Bestimmung der RE im Nahbereich mit < 5 m mit einer Genauigkeit von $\leq 0,1 \ \text{mm}$ möglich. Das diese Größenordnung erreicht wird, zeigen die in den Tabellen 4.5 und 4.6 dargestellten Werte für die Stationierung und RE-Schätzung. Daher werden die Parameter der RE als quasi wahre Werte im Rahmen der Ausgleichung verwendet.

Verknüpfung zwischen Referenzsystem und Bodyframe

Für die Verknüpfung von r mit b sind die in der Gleichung 4.6 dargestellten 6-DoF nötig. In der hier durchgeführten Umsetzung erfolgt dies durch direkte Messung des in r stationierten Lasertrackers zu der am Laserscanner montierte T-Probe, welche b realisiert. Eine detaillierte Vorstellung der Vorgehensweise und des Messprinzips sind im Abschnitt 2.7 erläutert. Um die Messung möglichst optimal durchzuführen, wird der Lasertracker auf Höhe der am Laserscanner montierten T-Probe und in einem Abstand von ca. 2 m aufgestellt. Es werden mehrere Messungen durchgeführt, aus diesen werden im Anschluss die Mittelwerte (Gleichung 3.7) und die Standardabweichungen (Gleichung 3.12) für 6 DoF berechnet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4.7 zusammengestellt. Die berechneten Mittelwerte werden dem Beobachtungsvektor, vergleiche Gleichung 4.12, hinzugefügt. Die Standardabweichungen der Mittelwerte werden in die entsprechende VKM

 Tabelle 4.7: Berechnete Mittelwerte der Georeferenzierungsmessungen mit dem Leica AT 960 bei der Systemkalibrierung.

Mossung	t_X	t_Y	t_Z	ω	φ	κ
messung	[m]	[m]	[m]	[gon]	[gon]	[gon]
1	$12,\!5869007$	14,3944797	1,2965655	-199,79125	-399,71542	-99.72351
2	$12,\!5799549$	$14,\!3900519$	1,2544665	-200,23134	$-399,\!69304$	-99.16506

$$\boldsymbol{\Sigma}_{t}|_{b}^{r} = \begin{bmatrix} s_{t_{X}}^{2} & 0 & 0\\ 0 & s_{t_{Y}}^{2} & 0\\ 0 & 0 & s_{t_{Z}}^{2} \end{bmatrix}_{b}^{r} \quad \text{und} \quad \boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\varpi}}|_{b}^{r} = \begin{bmatrix} s_{\omega}^{2} & 0 & 0\\ 0 & s_{\varphi}^{2} & 0\\ 0 & 0 & s_{\kappa}^{2} \end{bmatrix}_{b}^{r}$$
(4.21)

übernommen. Diese wiederum werden für die Aufstellung der VKM der Beobachtungen Q_{ll} benötigt, vergleiche Gleichung 4.15. Auf die Einführung von Korrelationen wird verzichtet, da hierfür keine genauen Informationen vorliegen. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten, vergleiche Tabelle 2.7, werden bewusst nicht verwendet. Grund dafür ist, dass die hier angegebenen Werte als zu pessimistisch eingeschätzt werden. Die angegebene Unsicherheit für die Messung vom Leica AT960 setzt sich aus dessen Unsicherheit $U_{x,y,z} = \pm 15 \,\mu\text{m} + 6 \,\mu\text{m/m}$ erweitert um die der T-Probe $U_{x,y,z} = \pm 35 \,\mu\text{m/m}$ zusammen. Auch wenn dieser Wert noch entsprechend der Gleichung 3.25 in eine Standardunsicherheit zu überführen ist, wird dieser hier nicht verwendet. Es wird abgeschätzt, dass durch den hier verwendeten statischen Messaufbau mit einer kurzen Entfernung von 2 m und einer optimalen Ausrichtung zwischen AT960 und T-Probe nur wenige signifikante systematische Abweichungen auftreten. Daher werden hier die Mittelwerte und Standardabweichungen, welche sich aus den erfassten 6 DoF der Messungen 1 und 2 berechnen, verwendet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4.8 zusammengefasst. Die Werte stellen realistischere Genauigkeitsangaben für die

Messung	Anzahl	s_{t_X}	s_{t_Y}	s_{t_Z}	s_ω	s_{arphi}	s_κ
Messung	Einzelmessungen	[mm]	[mm]	[mm]	[gon]	[gon]	[gon]
1	25	0,0019	0,0028	0,0011	0,00036	0,00055	0,00053
2	30	0,0021	0.0025	0,0010	0,00023	0,00043	0,00040

 Tabelle 4.8: Berechnete Standardabweichungen der Mittelwerte, aus den Georeferenzierungsmessungen mit dem Leica AT960 zur T-Probe.

erfolgten 6 DoF Messungen dar. Auch der Umstand, dass dadurch keine Aussage hinsichtlich der Richtigkeit getroffen werden kann, ist hier zu akzeptieren. Hierbei ist anzumerken, dass auch die Richtigkeit für eine exakte Betrachtung mit einbezogen werden muss. Eine Bestimmung der systematischen Abweichungen, ist jedoch aufgrund der fehlenden Kenntnisse über die Sensoren, für den Nutzer schwer möglich.

Erfassung der Referenzebenen durch Laserscanning

Zusätzlich zur Bestimmung der RE durch den Lasertracker in r werden diese durch den Laserscanner des k-TLS-basierten MSS erfasst. Verwendet werden die Modelle Z+F IMAGER 5010 (Messung 1) und Z+F IMAGER 5016 (Messung 2). Die Parameter, mit welchen die Messungen durchgeführt wurden, sind in der Tabelle 4.9 dargestellt. Von den jeweils erfassten 500 Profilen wurden die ersten 250 Profile nicht im Rahmen der Auswertung mit berücksichtigt. Der Grund hierfür ist,

Mossung	7 F Modell	Auflösung	Qualität	Laser-Messfreq.	Anzahl	Pixel/
Messung	Z⊤r moden	Aunosung	Quantat	[kHz]	Profile	Profil
1	IMAGER 5010	mittel	premium	32	500	5000
2	IMAGER 5016	mittel	niedrig	273	500	5000

Tabelle 4.9: Angaben zu den TLS-Messungen der Systemkalibrierung.

dass es in der ersten Phase der Messung noch zu Aufwärm-Effekten, welche die Distanzmessung beeinflussen, kommen kann. Die daraus resultierenden systematischen Abweichungen, sollen hier vermieden werden.

Wie im Abschnitt 2.4.1 beschrieben stellen die polaren Messelemente $(D, hz, v)|_s$, welche der Laserscanner in seinem lokalen Sensorkoordiantensystem s erfasst, die originären Beobachtungen dar. Im Falle des Herstellers Z+F erfolgt bereits intern, unter Beachtung der Sensor-internen Kalibrierparameter, eine Umwandlung in kartesische Koordinaten. Da keine genaue Kenntnis über die Kalibrierparameter besteht, werden hier die kartesischen Koordinaten als Beobachtungen verwendet. Dies ist auch konsistent zu der Darstellung in Gleichung 4.5. Wie im Abschnitt 4.3.2 beschrieben, wird im Zuge der Ausgleichung die Anzahl der Beobachtungen pro RE auf eine konstante Anzahl reduziert. Im Rahmen der hier durchgeführten Prozessierung wird die Anzahl auf j = 100 zufällig ausgewählte Punkte für jede der verwendeten i RE reduziert. Diese erfolgt in zwei aufeinander folgenden Schritten, welche hier als räumliche Selektion und Reduktion bezeichnet werden. In der Abbildung 4.13 ist dieser Prozess exemplarisch für eine der RE dargestellt.



Abbildung 4.13: Selektion und Reduktion der Laserscannerbeobachtungen für die Ausgleichung im GHM.

Bei der räumlichen Grob-Selektion, werden zunächst alle Punkte, welche in dem entsprechenden Profilabschnitt der RE liegen, selektiert. Die hierfür benötigte Bounding Box wird über die Koordinaten, welche aus der Einmessung der RE mit den CCR entstammen, definiert. Die Koordinaten müssen jedoch vorab von r nach s transformiert werden. Der funktionale Zusammenhang ist durch die Gleichungen 2.4 - 2.2 gegeben. Da in diesem Fall die Transformationen in der umgekehrten Reihenfolge erfolgen, sind die Vorzeichen der verwendeten Translationen zu negieren und die entsprechenden Rotationsmatrizen zu invertieren. Als Transformationsparameter werden die im Rahmen der Systemkalibrierung vom Lasertracker zur T-Probe erfassten 6-DoF (Gleichung 4.6) sowie die Parameter (Gleichung 4.1) einer älteren Systemkalibrierung zwischen s und b verwendet. Dies ist hier ausreichend, da die erneute Adaption der T-Probe am Laserscanner in ähnlicher Lage und Ausrichtung erfolgt. Im Anschluss erfolgt eine Fein-Selektion der grob selektierten Bereiche. Dies geschieht mit Hilfe des RANSAC-Algorithmus. Nach Schätzung einer ausgleichenden Geraden, welche durch alle grob selektierten Punkte gelegt wird, werden im Anschluss alle Punkte, welche einen Abstand von ≥ 1 mm haben, eliminiert. Dieser Schwellwerte entspricht einem Vielfachen des angegebenen Distanzrauschens der verwendeten Laserscannermodelle, vergleiche Tabelle 2.3. Hierin sind jeweils als 1 σ spezifiziert (80% weiß) für den Z+F IMAGER 5010 0,3 mm und beim 5016 0.2 mm angegeben. Somit wird sichergestellt, dass Punkte, welche nicht auf die RE fallen eliminiert werden. Im Anschluss an die Fein-Selektion, wird die Anzahl der Punkte auf 100 reduziert. Die Auswahl erfolgt zufällig. Die kartesischen Koordinaten der j = 1...100 Punkte, welche auf den i = 11 verwendeten RE liegen, werden in den Beobachtungsvektor, siehe Gleichung 4.12, übernommen.

Zur Aufstellung des stochastische Modell und speziell der Kofaktormatix der Beobachtungen Q_{ll} , vergleiche Gleichung 4.15, werden die Unsicherheiten der kartesischen Koordinaten für die j =1...100 selektierten Punkte für jede der i = 11 RE benötigt. Die VKM ergibt sich aus

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{x}_{j_{RE_{i}}}}|_{s} = \begin{bmatrix} \sigma_{X1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y1} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Z1} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \sigma_{X100} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \sigma_{Y100} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \sigma_{Z100} \end{bmatrix}_{RE/I_{s}}$$

$$(4.22)$$

Die Bestimmung der Unsicherheiten der kartesischen Koordinaten (X, Y, Z)|s erfolgt durch VF aus den Unsicherheiten der polaren Messelemente $(\sigma_D, \sigma_{hz}, \sigma_v)|_s$. Die vom Hersteller Z+F angegebenen Unsicherheiten für die Horizontalrichtungs- (hz), Vertikalwinkel- v und Distanzmessung D für die verwendeten Laserscannermodelle IMAGER 5010 und 5016 wurden in den Tabellen 2.3 und 2.4 aufgelistet. Der Übersichtlichkeit halber, werden diese erneut hier in der Tabelle 4.10 aufgeführt. Als Gegenüberstellung wurden zusätzlich die zum Zeitpunkt der Messungen gültigen Werte aus den entsprechenden Kalibrierprotokollen in der Tabelle mit angegeben. Wie zu erwarten, ist fest-

Z F Modell	Serien-	Angab	en Date	nblatt (RMS)	Angab	en Kali	brierprotokoll
	Nr.	$\sigma_{hz} \ [^{\circ}]$	σ_v [°]	$\sigma_{D_{linear}}$ [mm]	σ_{hz} [°]	σ_v [°]	$\sigma_{D_{linear}}$ [mm]
IMAGER 5010C	3428	0.007^{1}	0.007^{1}	$\leq 1^1$	0.004	0.003	0.4
IMAGER 5016	060	0.004^2	0.004^2	$\leq 1 + 10 \frac{ppm^2}{mm^2}$	0.002	0.003	0.6

Tabelle 4.10: Genauigkeitsangaben für die Horizontalrichtungs- (σ_{hz}) , Vertikalwinkel- (σ_v) und Distanzmessung (σ_d) , getrennt nach zugehörigen Datenblatt bzw. dem zum Zeitpunkt der Messung gültigen Kalibrierprotokoll.

 1 (Z+F, 2010) 2 (Z+F, 2018)

zustellen, dass die vom Hersteller im Rahmen der internen Sensorkalibrierung bestimmten Werte unter denen der Spezifikationen liegen. Im Folgenden werden die Werte aus der Sensorkalibrierung verwendet, da diese spezifisch für den Zeitpunkt der Messung und für den entsprechenden Sensor gelten. Die Werte zur Horizontalrichtungs- (σ_{hz}) und Vertikalwinkelmessung (σ_v) werden direkt verwendet. Im Falle der Genauigkeit der Distanzmessung (σ_D) wird ähnlich wie in Lipkowski und Mettenleiter (2019) vorgegangen. Hier werden die Angaben des Linearitätsfehlers $\sigma_{D_{linear}}$ und des Rauschverhaltens zusammengefasst. Beim Linearitätsfehler handelt es sich um eine restliche Abweichung, welche sich aus einem Vergleich der kalibrierten EDM-Messwerte des Laserscanners mit einer per Laserinterferometer bestimmten Soll-Entfernung ergibt (Lipkowski und Mettenleiter, 2019). Im Rahmen dieser Arbeit wird der vom Hersteller im Rahmen der Sensorkalibrierung ermittelte Wert verwendet. Auf die Angaben des zum Rauschverhalten, vergleiche Tabelle 2.3, wird im Rahmen der Arbeit nicht zurückgegriffen. Der Grund dafür ist, dass hierfür lediglich eine grobe Abstufung nach Distanz und Grauwert vorliegt, siehe Z+F (2010) bzw. Z+F (2018). Alternativ wird das in Wujanz u. a. (2018a) vorgestellte auf Intensitäten basierte stochastische Modell verwendet. Durch die Gleichung

$$\sigma_D = a \cdot Inc^b + c \tag{4.23}$$

wird ein funktionalen Zusammenhang zwischen der Intensität Inc und der Standardabweichung der Distanzmessung σ_D hergestellt. Im Vergleich zu den Rauschangaben des Hersteller ist hierdurch eine konsistentere Ableitung von σ_D möglich.

Durch das stochastische Modell werden Einflüsse berücksichtigt, die durch die Objektdistanz, den Auftreffwinkel des Laserstrahls sowie den radiometrischen Eigenschaften einer Oberfläche hervorgerufen werden. Dieser Umstand kann dadurch begründet werden, dass sich alle genannten Einflussgrößen in der Signalstärke widerspiegeln und sich als Konsequenz daraus auch auf die Präzision der Streckenmessung auswirken. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass je schwächer ein Signal ist, desto höher ist das Messrauschen einer Streckenmessung und umgekehrt. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass keine skalierten sondern einzig die Rohintensitätswerte Inc verwendet werden (Wujanz u. a., 2017). Die Parameter a, b und c sind vorab zu bestimmen. Eine detailliertere Beschreibung der Bestimmung bzw. die Werte der Parameter können für den Z+F IMAGER 5010 aus Wujanz u. a. (2017) und für den Z+F IMAGER 5016 aus Jensen (2021) entnommen werden. Die verwendeten Parameter sind in der Tabelle 4.11 zusammengefasst. Für die in der Tabelle 4.11

Tabelle 4.11: Angabe der Koeffizienten des Intensitäts-basierten Modells.

Z+F ModellBezugsfrequenz [kHz]a [mm/Inc]bc [mm]IMAGER 5010127 $11,508^1$ $-0,928^1$ $1,136^1$ IMAGER 5016550 $51,384^2$ $-1,0177^2$ $0,1669^2$					
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Z+F Modell	Bezugsfrequenz [kHz]	a [mm/Inc]	b	c [mm]
IMAGER 5016 550 $51,384^2$ $-1,0177^2$ $0,1669^2$	IMAGER 5010	127	$11,508^{1}$	$-0,928^{1}$	$1,136^{1}$
	IMAGER 5016	550	$51,384^2$	$-1,0177^2$	$0,1669^2$

 1 (Wujanz u. a., 2017)

 2 (Jensen, 2021)

angegebenen Parameter a und c ist jedoch anzumerken, dass diese nur für die angegebene Bezugsfrequenz gelten. Erfolgt die Messung mit einer abweichenden Frequenz, so sind die Parameter aund c mit dem Faktor $\sqrt{2}$ anzupassen. Bei einer geringeren Messfrequenz wird durch den Faktor geteilt und im Falle einer höhere Messfrequenz wird mit ihm multipliziert. Dies wurde mit Bezug auf die in der Tabelle 4.9 angegebenen Messfrequenzen durchgeführt.

Tabelle 4.12: Darstellung der pro RE berechneten Mittelwerte der Rohintensitäten und abgeleiteten
Standardabweichungen der Distanzmessung σ_D .

Messung 1 - IMAGE	R 5010	Messung 2 - IMAGE	R 5010
Intensitätsbereich [Inc]	$\sigma_D \; [{\rm mm}]$	Intensitätsbereich [Inc]	$\sigma_D \; [\rm{mm}]$
0,9 - 2,7 Mio	$0,\!57$	1,5 - 2,7 Mio	0,24

Nach dem GUM, siehe JCGM (2008b, S. 18), wird hier die kombinierte Unsicherheit u_c bei der Distanzmessung verwendet. Die Komponenten $\sigma_{D_{linear}}$ und σ_D werden als unabhängig betrachtet und über

$$\sigma_{D_c} = \sqrt{\sigma_{D_{linear}}^2 + \sigma_D^2} \tag{4.24}$$

zusammengefasst. Die Werte von σ_{D_c} werden im Rahmen der VF verwendet.

Aufstellung der Bedingung und Ausgleichung der Parameter

Aus der Abbildung 4.12 ist zu erkennen, dass sich schließlich ein Schleifenschluss ergibt. Die einzige Lücke bilden die in der Gleichung 4.1 dargestellten unbekannten 6-DoF zwischen s und b. Unter der Annahme, dass die wahren Werte bekannt sind, ergibt sich nach dem funktionalen Zusammenhang nach Gleichung 4.7, dass die Abstände d_j der erfassten Punkte, vergleiche Gleichung 4.5, nach Transformation von s nach r zu Null werden. Dies würde einen perfekten Schleifenschluss entsprechen. Im Falle einer konkreten Umsetzung werden jedoch restliche Abweichungen d_j zwischen den RE und den durch den Laserscanner erfassten j Punkte verbleiben. Als Gründe hierfür sind zum einen die Messunsicherheiten der verwendeten Sensoren und zum anderen ein nicht vollständig aufgestellter funktionaler Zusammenhang zu nennen. Die Bestimmung der unbekannten Parameter erfolgt nach der im Abschnitt 4.2.3 dargestellten Vorgehensweise. Die hierfür verwendeten Näherungswerte, vergleiche Gleichung 4.11, entstammen einer vorherigen Systemkalibrierung und sind in der Tabelle 4.13 dargestellt.

		•	•			
Messung	$t_{X_0} [\mathrm{mm}]$	$t_{Y_0} [\mathrm{mm}]$	$t_{Z_0} [\mathrm{mm}]$	$\omega_0 [\text{gon}]$	φ_0 [gon]	κ_0 [gon]
1	0	-138	-152	200	0	100
2	0	-132	-154	200	0	100

Tabelle 4.13: Verwendete Näherungswerte für die Ausgleichung der Systemkalibrierung.

Die Parameterschätzung erfolgt iterativ in einem GHM, wobei als Abbruchkriterium 0,1 mm für die Translationen und 0,1 mgon für die Rotationen gewählt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Implementierung, nach der strengen Lösung des GHM, welche in Lenzmann und Lenzmann (2004) beschrieben ist. Jeweils für die Ausgleichung der Messung 1 und 2, wurde nach einer Anzahl von I = 3 Iterationen das vorgegebene Konvergenzkriterium des GHM erreicht. Als Ergebnis werden die 6 DoF zwischen s und b und deren Unsicherheiten (Standardabweichungen) bestimmt. Die Darstellung und die Diskussion der Ergebnisse erfolgt im Abschnitt 4.4.3.

4.4.3 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Systemkalibrierung für die Messungen 1 und 2 gezeigt. Die ausgeglichenen Parameter sowie deren ermittelte Standardabweichungen sind in der Tabelle 4.14 dargestellt. Bei beiden Messungen werden für die Translationen (t_X, t_Y, t_Z) Stan-

Parameter	Messung 1 - Z+F IMAGER 5010		Messung 2 - Z+F IMAGER 5016						
	Wert	Std.abw.	Wert	Std.abw.					
$t_X [\mathrm{mm}]$	-1,462	0,033	-2,477	0,030					
$t_Y \; [\rm{mm}]$	-138,115	0,035	-130,950	0,035					
$t_Z \; [\rm{mm}]$	$-151,\!559$	0,037	-155,301	0,034					
ω [gon]	$200,\!15945$	0,00132	200,25591	0,00122					
φ [gon]	0,04404	0,00100	-0,34817	0,00094					
κ [gon]	100,73119	0,00083	100,49441	0,00078					
$\hat{\sigma}_0^2$	1,1681		1,1970						

Tabelle 4.14: Ergebnisse der Parameterschätzung ohne Streckenoffset.

dardabweichungen im Bereich von 0,03 - 0,04 mm erreicht. Bei den Standardabweichungen der Rotationen liegen die der Parameter φ und κ bei 1 mgon bzw. darunter. Die von ω liegen mit

1,32 mgon (IMAGER 5010) und 1,22 mgon (IMAGER 5016) etwas über 1 mgon. Eine möglich Begründung für die höheren Werte bei den Standardabweichungen für den Parameter ω (Rotation um die X-Achse), liegt in der RE-Konstellation. Da für die Bestimmung der Rotation ω nur die RE #4 und 8 hoch sensitiv sind, ergibt sich hier im Vergleich zu den anderen Rotationen eine geringere Redundanz. Nach der Ausgleichung ergeben sich als für die Messung 1 und 2 die posteriori Varianzfaktoren nach Gleichung 3.59. Im Falle der Messung 1 ergibt sich $\hat{\sigma}_0^2 = 1,1681$ und bei der Messung 2 $\hat{\sigma}_0^2 = 1,1970$, vergleiche Tabelle 4.14. Ein Globaltest nach Gleichung 3.60 ergibt, dass in beiden Messungen die Nullhypothese H_0 zur verwerfen ist. Nach Niemeier (2008, S. 151) gibt es dafür folgende Ursachen:

- σ_0^2 gilt nicht für die tatsächlichen Messbedingungen,
- dass funktionale Modell ist nicht zutreffend bzw.,
- dass stochastische Modell ist nicht zutreffend, wobei hier Ausreißer oder systematische Abweichungen, eine falsche Gewichtung zwischen den Beobachtungsgruppen oder vernachlässigte Korrelationen die Ursache sein können.

Die Wahrscheinlichkeit, dass es an den beiden ersten genannten Punkten liegt, wird hier eher als gering eingeschätzt. Die Messbedingungen sind aufgrund der Laborumgebung stabil. Daher wird hier keine signifikante Auswirkung vermutet. Die Möglichkeit, dass die Verwerfung von H_0 auf vernachlässigte Korrelation bzw. an einer falschen Gewichtung der Beobachtungsgruppen zurückzuführen ist, wird als gering bewertet. Durch die beschriebene Vorgehensweise wird das Auftreten von Korrelationen minimiert. Als Beispiel ist hier die durchgeführte Selektion und Reduktion der Laserscannerpunkt zu nennen. Hierdurch wird auch vermieden, dass Ausreißer in den Daten verbleiben. Eine Möglichkeit für den nicht bestanden Globaltest, stellen verbleibende restliche systematischen Abweichungen dar. Daher werden die verbleibenden Widersprüche betrachtet. In den Abbildungen 4.14 und 4.15 sind die abschließenden Widersprüche zwischen den Beobachtungen zu den jeweiligen RE dargestellt. Die grünen Linien signalisieren die Trennung nach den einzelnen elf RE. Als Mittelwert für die Widersprüche ergibt sich 0,52 mm bei der Messung 1 und 0,50 mm bei Messung 2.



Abbildung 4.14: Darstellung der Widersprüche aus Messung 1 (Z+F IAMGER 5010) mit elf RE.
Im Falle der Messung 1 (Z+F IMAGER 5010) sind bei den seitlich angeordneten RE (1-3 und 9-11) positive Widersprüche, welche bei einem Niveau von 1 mm liegen, zu verzeichnen. Im Falle der RE 4-8 ist liegt das Niveau der Widersprüche bei 0 mm. Des Weiteren ist eine höhere Streuung der Widersprüche bei den RE 2, 6 und 10 festzustellen. Diese RE haben eine senkrechte Ausrichtung zum Laserscannerprofil, was bedeutet, dass der Auftreffwinkel bei ca. 100 gon liegt. Hierdurch besitzt das zurückgestrahlte Signal mehr Intensität. Die Vermutung ist hier, dass dies zu einem erhöhten Messrauschen bei der Distanzmessung führt.



Abbildung 4.15: Darstellung der Widersprüche aus Messung 2 (Z+F IAMGER 5016) mit elf RE.

Die Widersprüche der Messung 2 (Z+F IMAGER 5016) zeigen ein ähnliches Verhalten, wie die der Messung 1. Ein Unterschied ist jedoch bei der RE 6 festzustellen. Hier weisen die Widersprüche im Schnitt einen Offset von 0,5 mm auf. Wie auch die RE 2 und 10, hat die RE 6 eine senkrechte Orientierung zum Laserscannerprofil. Da die Richtung der Widersprüche hier mit der der Distanzmessung übereinstimmt, wird vermutet, dass der Offset aus einer systematischen Abweichung bei der Distanzmessung resultiert. Im Falle der RE 2, 6 und 10 würde dieser mit dem vollen Betrag eingehen. Testweise wurden daher die Distanzen in beiden Messungen (1 und 2) um einen systematischen Betrag verändert. Durch Anbringen eines Offsets von 0,2 mm führt zu den Widersprüchen, welche in den Abbildung 4.16 (Messung 1) und 4.17 (Messung 2) dargestellt sind. Die Mittelwerte der Widersprüche betragen nun 0,46 im Falle der Messung 1 und 0,4 bei der Messung 2. Es ist zu erkennen, dass nun im Falle der RE 2 und 10 die Widersprüche um ein Niveau von 0 streuen. Die ist auch bei den Widersprüchen der RE im Falle der Messung 2 (Z+F IMAGER 5016 so. Bei der Messung 1 mit dem Z+F IMAGER 5010 verändert sich das Niveau der Widersprüche auf ca. -0,5 mm, vergleiche Abbildung 4.16. Dies betrifft zudem auch die RE 4 und 5 sowie 7 und 8.

Daraus folgt, dass zwar die Widersprüche im Mittel reduziert werden, aber weiterhin ein unterschiedliches Niveau zwischen den Widersprüchen der RE 1-3 und 9-11 auf der einen Seite und den RE 4-8 auf der anderen Seite besteht. Analog verhält es sich auch in der Messung 2, wobei anzumerken ist, dass hier die Unterschiede geringer ausfallen. Dies zeigt sich auch in dem berechneten Mittelwert von 0,4 mm, welcher im Vergleich zur Messung 1, hier wird 0,46 mm erreicht, etwas geringer ausfällt.

In der Tabelle 4.15 sind die Ergebnisse der Parameterschätzung mit einem angebrachten Offset von 0,2 mm bei der Distanzmessung dargestellt. Des Weiteren zeigt die Tabelle die Differenzen, welche



Abbildung 4.16: Darstellung der Widersprüche aus Messung 1 (Z+F IMAGER 5010) mit elf RE, nach Berücksichtigung eines Distanzoffsets von 0,2 mm für die Distanzmessung.



Abbildung 4.17: Darstellung der Widersprüche aus Messung 2 (Z+F IMAGER 5016) mit elf RE, nach Berücksichtigung eines Distanzoffsets von 0,2 mm für die Distanzmessung.

sich zu den Parametern ohne Offset (vergleiche Tabelle 4.14) ergeben. Bei der Translation t_Z treten die größten Differenzen auf. Bei der Messung 1 beträgt diese ca. -0,03 mm und bei der Messung 2 beträgt sie 0,04 mm. Damit wird die Größenordnung der jeweils berechnete Standardabweichung für t_Z erreicht bzw. im Falle der Messung 2 überschritten, vergleiche Tabelle 4.15. Bei den Rotationen treten nur sehr geringe Differenzen auf, welche im Falle der Messung 1 alle unter den Werten der berechneten Standardabweichungen liegen. Dies trifft auch auf die Messung 2 zu. Bei der Rotation ω wird die größte Werte mit 0,93 mgon erreicht. Dieser liegt auf dem Niveau der berechneten Standardabweichung von ω , welche 1 mgon beträgt.

Parameter	Messung 1	- Z+F IMA	GER 5010	Messung 2 - Z+F IMAGER 5016			
	Wert	Std.abw.	Diff.	Wert	Std.abw.	Diff.	
$t_X \text{ [mm]}$	-1,474	0,029	-0,012	-2,481	0,024	-0,004	
$t_Y \text{ [mm]}$	-138,102	0,030	-0,013	-130,937	0,029	-0,013	
$t_Z \; [mm]$	$-151,\!526$	0,032	0,033	-155,260	0,028	-0,041	
ω [gon]	200,15927	0,00115	-0,00018	200,25498	0,00100	-0,00093	
φ [gon]	0,04444	0,00087	-0,00040	-0,34786	0,00077	0,00031	
κ [gon]	100,73122	0,00075	0,00003	100,49425	0,00064	0,00016	
$\hat{\sigma}_0^2$		1,0172		0,9817			

 Tabelle 4.15: Ergebnisse der Parameterschätzung mit Streckenoffset.

Nach der Ausgleichung ergeben sich für den posteriori Varianzfaktor bei der Messung 1 $\hat{\sigma}_0^2 = 1,0172$ und bei Messung 2 $\hat{\sigma}_0^2 = 0,9817$. Diese Werte sind im Vergleich zu denen, welche bei der Ausgleichung ohne Distanzoffset erreicht wurden geringer und näher am theoretischen Wert 1. Der durchgeführte Globaltest wurde für beide Messungen bestanden. Es bleibt aber anzumerken, dass in den Widersprüchen einige Systematiken verbleiben. Hieraus lässt sich vermuten, dass die verbleibenden systematischen Abweichungen im Rahmen des Globaltests durch die Standardabweichungen überdeckt werden. Ein kurze Diskussion und Analyse der Ergebnisse wird im nächsten Abschnitt gegeben.

Diskussion der Ergebnisse

Für beide Systemkalibrierungen (Messung 1 und 2), wurden die 6 DoF zwischen s und b bestimmt. Die Translationen konnten mit einer Standardabweichungen von $\leq 0,04$ mm und bei der Rotationen mit $\leq 1,4$ mgon bestimmt werden.

Wie bereits beschrieben, verbleiben auch nach dem Anbringen eines Distanzoffset restliche Systematiken in den Widersprüchen der Messungen 1 und 2. Dies zeigen die unterschiedlichen Niveaus der einzelnen RE. Im Falle einer optimalen Lösung sollten die Widersprüche um das Niveau von 0 mm mit dem verbleibenden Messrauschen streuen. Auch wenn die Mittelwerte der Widersprüche mit 0, 46 (Messung 1) und 0, 4 (Messung 2) verhältnismäßig klein sind, so ist doch zu resümieren, dass weitere Systematiken in den Widersprüchen verbleiben. Dies betrifft die RE 1 - 3 und 9 - 11, welche in beiden Messungen im Mittel positive Widersprüche aufweisen, siehe 4.16 und 4.17. Die RE 4 - 8 weisen dagegen im Schnitt negative Widersprüche auf. Eine Ausnahme stellt die RE 6 in der Messung 2 (Z+F IMAGER 5016) dar. Hier streuen die Widersprüche um 0.

Die Gründe für die verbleibenden Systematiken können vielseitig sein. Mögliche Ursachen sind z. B. die Umgebung der Messung, der gewählte Messaufbau oder die verwendeten Sensoren. Ersteres sollte hier durch die sehr konstanten Verhältnisse im Labor des GIH weniger problematisch sein. Des Weiteren werden durch die feste Kalibrierumgebung und die verwendeten RE aus ALUCORE[®] eine stabile und homogene Umgebung geschaffen.

Beim Messaufbau ist die Anordnung der RE eines der wesentlichen Aspekte. Wie bereits im Abschnitt 4.3.4 beschrieben, gibt es keine RE unterhalb des Laserscanners. Für die Bestimmung der Translation t_Z sind die RE 4 - 8 sensitiv. Da für die RE 5 - 7 keine symmetrische Anordnung unterhalb des Laserscanners möglich ist, können sich systematische Abweichung einseitig auf die Bestimmung der Parameter auswirken. Dies könnte die Ursache für den Versatz der RE 4 - 8 sein. Eine weitere Möglichkeit sind systematische Abweichungen, welche von den verwendeten Sensoren stammen.

Bezüglich der Messungen mit dem Lasertracker ist zu resümierten, dass die verbleibenden Systematiken in den Widersprüchen, zum Teil deutlich außerhalb der angegebenen Spezifikationen liegen. Eine Bestimmung der Translationen sollte demnach im Nahbereich mit ≤ 1 mm möglich sein. Um den Einfluss der Abweichungen auf die Bestimmung der Rotationen bei der 6 DoF Messung zu untersuchen, wird die Abweichung in den Widersprüchen in ein Winkelmaß überführt. Beträgt diese 1 mm und die Messdistanz 4 m ergibt sich eine Änderung bei den Rotationen von 15 mgon. Dies überschreitet die Spezifikationen bei der 6 DoF Messung, vergleiche Tabelle 2.7. Auch durch die Stationierung des Lasertrackers ist diese Größenordnung der Abweichung nicht zu erklären. Daher ist die Messung mit dem Laserscanner näher zu betrachten. Im Speziellen sind dies die systematischen Abweichungen, welche bei der Messung mit dem Laserscanner auftreten. Seitens des Herstellers, wird für die verwendeten Laserscanner IMAGER 5010 und 5016 eine Sensorkalibrierung durchgeführt. Über die genaue Durchführung der Sensorkalibrierung durch den Hersteller liegen keine detaillierten Kenntnisse vor. Die hierin bestimmten Parameter werden im Rahmen der intern durchgeführten Datenprozessierung berücksichtigt. Trotzdem liegt die Vermutung nahe, dass auch nach Anbringen der Korrekturen restliche Systematiken verbleiben. In der Tabelle 2.2 sind wesentliche systematische Effekte, welche bei Laserscannern auftreten, zusammengefasst. Für den Nutzer besteht die Möglichkeit den verwendeten Laserscanner zu überprüfen. Hier wurde in den letzten Jahren einige Vorgehensweisen publiziert, beispielhaft ist hier Muralikrishnan u.a. (2015) zu nennen. Die im Rahmen der Überprüfung bestimmten systematischen Abweichungen können dann verwendet werden um das funktionale Modell zu erweitern. Auf dieses Vorgehen wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht zurückgegriffen.

Zusammenfassend ist zu festzuhalten, dass eine weitere Untersuchung der Laserscannermessung, im speziellen die verbleibenden systematischen Abweichungen näher zu untersuchen sind. Zukünftig könnte der Messprozess erweitert werden, dabei wird der Laserscanner um 200 gon gedreht. Mit Hilfe dieser zusätzlichen Messung, welche prinzipiell einer Messung in zwei Lagen entspricht, können möglicherweise einige der systematischen Abweichungen reduziert werden. Des Weiteren können hierdurch im Rahmen einer erweiterten Analyse die Ursache und die Auswirkungen der systematischen Abweichungen genauer untersucht werden.

5 Georeferenzierung der mobilen Plattform

In diesem Kapitel wird das Thema Georeferenzierung beschrieben. Diese stellt neben der Synchronisierung und der Systemkalibrierung eine der Hauptherausforderungen des k-TLS dar. Das wesentliche Ziel ist die Bestimmung der Trajektorie der mobilen Plattform. Damit verbunden ist schließlich die Georeferenzierung der erfassten Laserscannerdaten. Die Plattform besteht meist aus mehreren Sensoren, welche zu einem MSS zusammengefasst sind. Bei den Sensoren wird generell in zwei Arten unterschieden. Zum einen in die objekterfassenden Sensoren, hierzu gehören z. B. Laserscanner oder Kameras. An dieser Stelle ist jedoch anzumerken, dass auch die Daten der erfassenden Sensoren für die Georeferenzierung genutzt werden können, vergleiche Abschnitt 2.6.2. Die andere Art stellen Sensoren dar, deren Daten ausschließlich für die Georeferenzierung genutzt werden. Hierzu gehören z. B. GNSS, IMU, Odometer, Zeilenscanner und Inklinometer. Eine weitere Art der Georeferenzierung ist die Verwendung von externen Sensoren, wie z. B. Tachymeter oder Lasertracker. Auf diese wird im Rahmen dieser Arbeit zurückgegriffen. Einen Überblick über die unterschiedlichen Arten der Georeferenzierung beim k-TLS erfolgt im Abschnitt 2.6.2.

Das primäre Ziel der Georeferenzierung ist die Bestimmung der 6 DoF zwischen dem Bodyframe *b* (lokales Plattformkoordinatensystem) und dem übergeordneten Referenzkoordinatensystem *r*. Analog zur Systemkalibrierung bestehen die 6 DoF aus je drei Translationen und Rotationen, vergleiche Gleichung 5.1. Die 6 DoF werden dabei, während sich die Plattform bewegt, durchgängig zu diskreten Zeitpunkten erfasst. Um die erfassten Daten georeferenzieren zu können, müssen diese zeitlich zusammengeführt werden (Synchronisierung). Hierfür wird in dieser Arbeit eine Hardware-basierte Vorgehensweise verwendet, vergleiche Abschnitt 2.7.2. Das genaue Messprinzip der Georeferenzierung wird im Abschnitt 2.7.3 erläutert. Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist eine punktweise Georeferenzierung der k-TLS Daten. Hierbei soll die Bewegungsform, welche die Plattform vollführt, mit beachtet werden. Dies erfolgt mit einem iEKF, welcher den Zustand zwischen den einzelnen Profilen (Epochen) prädiziert. Somit werden die für die Georeferenzierung benötigten Informationen auf alle Einzelpunkte des Profiles übertragen.

In diesem Kapitel werden zunächst einige Strategien und Ansätze bei der Georeferenzierung von k-TLS-basierten MSS vorgestellt. Der Fokus wird dabei auf die Umsetzungen, bei welchen das KF verwendet wird, gelegt. Im Anschluss wird der messtechnische Ablauf kurz dargestellt. Hierbei wird erläutert, warum eine punktweise und auf die Bewegungsform der mobilen Plattform bezogene Georeferenzierung erfolgen soll. Dies stellt die wesentliche Grundlage dar, warum ein Filtermodell verwendet wird. Dessen Umsetzung und Implementierung wird im Folgenden näher erläutert. Anhand von durchgeführten Testmessungen wird die Umsetzung validiert. Dabei werden zunächst der Messaufbau und die verwendeten mobilen Plattformen, dies sind ein Rollwagen und ein Seilschlitten, beschrieben. Die Validierung erfolgt zum einen mit Hilfe des Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2)-Algorithmus nach Lague u. a. (2013). Dieser berechnet die Distanzen zwischen den erfassten k-TLS Punktwolken und einem Referenzdatensatz. Dieser wurde mit einer Leica T-Scan erfasst. Abschließend wird die Prozessierung der Daten analysiert und interpretiert. Hierfür werden zum einen die M3C2-Distanzen und zum anderen die aus dem Filter berechneten Innovationen verwendet.

5.1 Strategien und Ansätze

Aufbauend auf dem im Abschnitt 2.6.2 erfolgten generellen Überblick über die Georeferenzierungsmethoden beim k-TLS wird die Thematik in diesem Abschnitt erneut aufgegriffen. Aufgrund der späteren spezifischen Umsetzung bei der Georeferenzierung der mobilen Plattform des k-TLSbasierten MSS wird die Darstellung jedoch an dieser Stelle auf einige wesentliche Merkmale eingeschränkt. Diese Merkmale sind die Verwendung von zusätzlichen (georeferenzierenden) Sensoren und eines Filters, welcher im Sinne der Datenfusion verwendet wird. Aufgrund seiner Charakteristik bietet sich hierfür das KF nach Kalman (1960) an. Dessen grundlegender Ansatz besteht darin den Zustand von Systemen zeitabhängig zu beschreiben. Eine Anwendung im Falle von k-TLS ist daher sinnvoll. Im Speziellen wird durch das KF eine Schätzung von definierten Zustandsgrößen eines bewegten Systems in diskreten Zeitschritten ermöglicht. Die mathematischen Grundlagen sind im Abschnitt 3.5.1 beschrieben. Des Weiteren bietet das KF die Möglichkeit stochastische Informationen der verwendeten Sensoren sowie ein vorab formuliertes Bewegungsmodells zu integrieren. Letzteres wird für die Prädiktion des Systemzustandes zwischen den einzelnen Epochen verwendet.

In den letzten Jahren wurden für die kinematische Objekterfassung einige MSS entwickelt. Für die Georeferenzierung wird hierbei oft eine Kombination von GNSS-Empfängern und IMU verwendet. Diese Kombination ist vorteilhaft, können aus den GNSS Beobachtungen Koordinaten im übergeordneten einbezogenen Referenzsystem sowie die Geschwindigkeiten abgeleitet werden. Die IMU liefert die Beschleunigungen und die Winkelgeschwindigkeiten. Werden diese Parameter zusammengefasst, ist eine Beschreibung des Zustandes der Plattform möglich. Weitere (ergänzende) Sensoren eines k-TLS-basierten MSS sind z. B. Gyroskop, Barometer, Wegsensoren und Kameras.

Neben der Bestimmung des geometrischen/räumlichen Bezuges stellt die Synchronisation eines der wesentlichsten Forderungen dar. Diese hat das Ziel, einen einheitlichen zeitlichen Bezug zu zwischen den einzelnen Sensoren zu schaffen. Hierdurch wird die Grundlage für eine gemeinsame Prozessierung der Daten ermöglicht, siehe Hennes u. a. (2014). Oft wird eine Hardware-basierte Lösung verwendet. Hierbei existieren unterschiedliche Ansätze. Eine Möglichkeit, besteht darin einen externen Taktgeber zu nutzen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit einen der verwendeten Sensoren als Taktgeber zu nutzen. Weit verbreitet ist hier die Nutzung von GNSS-Empfängern, welche ein Puls pro Sekunde (PPS)-Signal ausgeben. Darüber hinaus besteht hierdurch die Möglichkeit die erfassten Daten in ein globales Zeitsystem zu überführen. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung des Laserscanners, welcher eine TTL-Signal erzeugt. Eine detailliertere Beschreibung hierzu erfolgt im Abschnitt 2.7.2. Bei den im Folgenden vorgestellten kinematischen Erfassungssystemen erfolgt die Synchronsierung meist Hardware-basiert. Hierdurch wird die Grundlage für die Datenerfassung bei der Georeferenzierung geschaffen. Die Bestimmung der benötigten Parameter erfolgt mit Hilfe des KF.

Ein Beispiel ist das Vermessungssystems KiSS (Sternberg, 1998). Die Prozessierung der Georeferenzierung erfolgt hier als dezentrales KF. Der Ablauf ist kaskadierend, wobei dem eigentlichen Hauptfilter pro Sensor ein Vorfilterungsschritt vorgeschaltet ist (Sternberg, 2000). Ein weiteres Beispiel ist das Mobile Straßen-Erfassungs-System (MoSES). Auch hier erfolgt die Schätzung der für die Georeferenzierung benötigten Größen im Rahmen eines KF. Diese stehen im Anschluss für jede Epoche zur Verfügung und bilden die Grundlage für die Georeferenzierung der Laserscannerprofile. Um eine zusätzliche Glättung der Daten zu erreichen, wird das Filter vorwärts und rückwärts angewendet (Gräfe, 2008). Eine ähnliche Vorgehensweise erfolgt auch in Hesse (2007). Auch hier werden pro Epoche (Laserscannerprofil) die Parameter für die Georeferenzierung per KF mit Glättung bestimmt. Es erfolgt jedoch eine Betrachtung zwischen den Epochen. Bei der Prozessierung der Laserscannermessungen wird linear interpoliert. In Keller und Sternberg (2013) wird die Verwendung eines k-TLS-basierten MSS, welches im Outdoor- bzw. Indoorbereich verwendet werden kann, vorgestellt. Während Outdoor eine Kombination von GNSS, IMU und Odometer verwendet werden, wird Indoor statt GNSS ein Tachymeter für die Georeferenzierung verwendet. Die Synchronisierung zwischen dem Tachymeter und dem MSS erfolgt dabei durch Kreuzkorrelation. Die Bestimmung der Parameter für die Georeferenzierung erfolgt unter anderem durch einen EKF. Als Bewegungsmodell werden in der Horizontalen eine Gerade oder ein Kreisbogen verwendet. Für die vertikale Komponente wird eine feste Höhe bzw. eine schiefe Ebene angenommen. Bei dem Ansatz wird die Geschwindigkeiten als konstant betrachtet (Keller, 2015).

Auch seitens der Wirtschaft wurden in den letzten Jahren einige k-TLS-basierte MSS entwickelt. Exemplarisch sind hierfür der VMX-2HA von RIEGL (Riegl, 2021), das MX50 von Trimble (Trimble, 2022), sowie das Mobile Urban Mapping System (MUM) vom Fraunhofer IPM (Fraunhofer IPM, 2019) genannt. Letzteres besitzt ein modulares Systemkonzept und kann mit unterschiedlichsten Sensoren bestückt werden. Hierzu zählen unterschiedlichste Typen von Laserscannern und Kameras. Für Details sei auf Reiterer u.a. (2022) verwiesen. Neben dem Trend die MSS so anzupassen, dass die variable Aufgabenstellungen erfüllen können, ist auch die Entwicklung hin zu immer kompakteren, leichteren und variableren Systemen zu beobachten. Hieraus ergeben sich neue Möglichkeiten der Plattformnutzung. Ein Beispiel ist die Nutzung von Unmanned Aerial Vehicles (UAV). Durch die besonderen Dynamik in der Bewegung, wie z. B. Vibrationen, ergeben sich neue Herausforderungen. Hierzu gehören die Entkoppelung der Sensoren von der Plattform bzw. die Entwicklung neuer Filtermodelle, welche dies mit berücksichtigen, beispielhaft sei hier auf Zwiener (2019) verwiesen. Des Weiteren ist aber nicht nur ein Trend bei neuer Hardware und den Prozessierungsalgorithmen zu beobachten, auch auf dem Gebiet der Auswerteansätzen gibt es Erweiterungen. Als ein Trend zeichnet sich beispielsweise die Kombination von unterschiedlichen Ansätzen ab. Neben einer erhöhten Redundanz und wird die Qualität der Daten verbessert. Als ein Beispiel ist die Nutzung von Informationen aus dem Objektraum zu nennen, siehe Vennegeerts (2011). Hierin werden Liniensegmente aus den erfassten k-TLS-Daten bestimmt. Diese werden verwendet um die Rollwinkelgeschwindigkeiten zu schätzen. Dies geschieht im Rahmen eines kombinierten KF. Hier fließen des Weiteren die erfassten Rollwinkelgeschwindigkeiten eines Inklinometers ein. Durch diese gemeinsame Auswertung werden einige Nachteile minimiert, welche bei der Verwendung von Flüssigkeits-basierten Inklinometern auftreten. Hierzu gehören z.B. die Trägheit der Flüssigkeit oder die Effekte von Störbeschleunigungen. Die Problemstellung, dass eine Georeferenzierung mit GNSS in urbanen Gebieten mit vielen hohen Gebäude und engen Straßen problematisch ist, wird in Vogel (2020) aufgegriffen. Durch Integration der durch den Laserscanner gewonnenen Objektinformationen, hierzu gehören z. B. geometrische Bedingungen oder 3D-Gebäudeinformationen, wird die Georeferenzierung verbessert. Die Prozessierung erfolgt im Rahmen eines iEKF, welcher auch mit impliziten Gleichungen aufgestellt werden muss.

In den meisten der vorgestellten Ansätze erfolgt die Übertragung des Zustandes pro Epoche. Das bedeutet für das k-TLS, dass alle Punkte des Profiles mit den entsprechend ermittelten Parametern des Zustandes georeferenziert werden. Da ein Profil jedoch, je nach Einstellung der Messparameter, aus mehreren tausend Punkten bestehen kann, ist diese Vorgehensweise nicht exakt. Dies ist speziell im Falle von schnellen und dynamischen Bewegungen nicht ausreichend. Als Beispiel sei hier eine Plattform genannt, welche sich mit 1 m/s bewegt. Im Falle einer Rotationsgeschwindigkeit des Laserscanners von 50 rps ergibt sich ein Versatz von 2 cm zwischen zwei Profilen. Hieraus lässt sich die Notwendigkeit ableiten, eine Georeferenzierung zu verwendet, welche punktweise erfolgt. Ähnlich wie in einigen der erwähnten Ansätzen werden im Zustandsvektor Translationen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen eingeführt. Bei der hier erfolgten Umsetzung werden auch die Rotationsbeschleunigungen miteingeführt. Dies führt dazu, dass die Rotationsgeschwindigkeiten als nicht konstant angenommen werden. Hierdurch wird den Abweichungen entgegengewirkt, welche sich im Falle einer besonders dynamischen Bewegung ergeben.

5.2 Messtechnischer Ablauf

In diesem Abschnitt wird die Georeferenzierung der mobilen Plattform anhand des im Abschnitt 2.7 vorgestellten Messprinzipes und des k-TLS-basierten MSS beschrieben. Das MSS besteht aus einem Laserscanner (hier Z+F IMAGER 5010), an welchem eine T-Probe montiert ist. Die Georeferenzierungsmessung (Trajektorienbestimmung) erfolgt durch einen Lasertracker (Leica AT960). Als mobile Plattformen kommen ein Rollwagen und ein Seilschlitten System zum Einsatz. Eine detaillierte Beschreibung der Sensoren und des Messprinzips erfolgt im Abschnitt 2.7.3. Der wesentliche Vorteil ist die direkte Bestimmung der 6 DoF $|_{b}^{l}$ zwischen dem Lasertracker l und der T-Probe b.

Wird der Lasertracker in einem übergeordneten Referenzkoordinatensystem r stationiert, so bezieht sich die Georeferenzierung direkt auf r. Aus der Stationierung werden die 6 DoF $|_{l}^{r}$ zwischen dem lokalen Koordinatensystem des Lasertrackers l und dem Referenzkoordinatensystem r gewonnen. Liegen die 6 DoF $|_{s}^{b}$ zwischen lokalen Koordinatensystem des Laserscanners s und dem Body-frame b vor, so kann ein in s erfasster Punkt nach r transformiert werden. Die mehrstufige Transformation ergibt sich nach den Gleichungen 2.2, 2.3 und 2.4. Die Synchronisierung zwischen dem Laserscanner und dem Lasertracker erfolgt Hardware-basiert über ein Triggersignal, welches der Laserscanner am Start des Profils (Nulldurchlauf) generiert. Eine detaillierte Darstellung des Prinzip erfolgt im Abschnitt 2.7.2. In diesem wurde auch der Einfluss möglicher Latenzen abgeschätzt. Als Gesamtverzögerung wurde ein Wert von 0,75 µs bestimmt. Im Falle einer Plattformgeschwindigkeiten von 1 m/s, resultiert daraus eine Abweichung von 0,75 µm. Dies wird mit Blick auf die angestrebte Gesamtgenauigkeit von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm bei einer 3D-Objekterfassung als vernachlässigbar eingestuft. Ausgehend von einem stationierten Lasertracker werden bei der Georeferenzierungsmessung für jedes Profil die 6 $\text{DoF}|_{b}^{r}$ bestehend aus je drei Translationen und Rotationen beobachtet. Jedes der Profile stellt eine Epoche, welche mit (k) bezeichnet wird, dar. Da im Rahmen dieses Kapitels die Winkelgeschwindigkeit mit ω bezeichnet wird, werden hier die Rotationen mit $(r_X r_Y r_Z)$ gekennzeichnet. Der Beobachtungsvektor ergibt sich

$$\boldsymbol{l}|_{r}^{b} = [\boldsymbol{t} \quad \boldsymbol{r}]^{T}|_{r}^{b} = [t_{X} \ t_{Y} \ t_{Z} \ r_{X} \ r_{Y} \ r_{Z}]^{T}|_{r}^{b}.$$
(5.1)

Für die Georeferenzierung aller N erfassten Punkte im Profil steht somit pro Epoche k je ein Satz Parameter zur Verfügung, vergleiche Gleichung 5.1. Ein möglicher Ansatz ist es, diese Parameter für die Transformation aller Profilpunkte als konstant anzunehmen. Dieses Prinzip ist in der Abbildung 5.1 dargestellt. Der Parameter ΔT stellt die Dauer (Umlaufzeit), ΔS die Translation und ΔR die Verdrehung eines gesamten Profiles dar.



Abbildung 5.1: Darstellung der k-TLS-basierten 3D-Objekterfassung (rote Punkte), ohne Berücksichtigung der Bewegung zwischen den Epochen k - 1 und k.

Streng genommen gilt die Georeferenzierungsmessung jedoch nur für den ersten Punkt des Profiles (Epoche) (k-1) bzw. (k). Da sich die mobile Plattform jedoch während der Messung eines Profils um die Distanz ΔS weiterbewegt, stellt dieser Ansatz keine exakte räumliche Georeferenzierung für

alle weiteren Punkte im Profil dar. Für die Laserscannermessungen wird hierdurch ein 2D-Profil angenommen. Dies entspricht jedoch nicht der Realität eines sich fortbewegenden k-TLS-basierten MSS.

Für eine realistischere Prozessierung ist daher die Bewegung zwischen den einzelnen Epochen (k-1)und (k) mit zu betrachten. Eine Möglichkeit die Bewegung zu beschreiben, ergibt sich aus dem Weg-Zeit-Gesetz. Hierdurch können die Änderungen in Abhängigkeit mit der Zeit τ bestimmt werden. Dies gilt für die Translationen $t(\tau)$ und die Rotationen $r(\tau)$. Es können die folgenden Bewegungsformen ausgedrückt werden: konstant (Gleichung 5.2), gleichförmig (Gleichung 5.3) und gleichmäßig beschleunigt (Gleichung 5.4). Es gelten die folgenden Zusammenhänge

$$\boldsymbol{t}(\tau) = \boldsymbol{t}_0 = konst. \qquad \text{bzw.} \quad \boldsymbol{r}(\tau) = \boldsymbol{r}_0 = konst. \tag{5.2}$$

$$\boldsymbol{t}(\tau) = \dot{\boldsymbol{t}} \cdot \tau + \boldsymbol{t}_0 \qquad \qquad \text{bzw.} \quad \boldsymbol{r}(\tau) = \dot{\boldsymbol{r}} \cdot \tau + \boldsymbol{r}_0 \qquad (5.3)$$

$$\boldsymbol{t}(\tau) = \frac{1}{2} \, \ddot{\boldsymbol{t}} \cdot \tau^2 + \dot{\boldsymbol{t}} \cdot \tau + \boldsymbol{t}_0 \qquad \qquad \text{bzw.} \quad \boldsymbol{r}(\tau) = \frac{1}{2} \, \ddot{\boldsymbol{r}} \cdot \tau^2 + \dot{\boldsymbol{r}} \cdot \tau + \boldsymbol{r}_0. \tag{5.4}$$

Es gelten die folgenden Bezeichnungen für die aufgeführten Größen: t_0 Anfangsposition, \dot{t} Geschwindigkeit und \ddot{t} Beschleunigung bzw. r_0 Anfangsrotation, \dot{r} Winkelgeschwindigkeit und \ddot{r} Winkelbeschleunigung. Somit lassen sich auch die Verschiebung ΔS und die Verdrehung ΔR zwischen den Profilen (k-1) und (k) abbilden. Hierfür gilt die Zeitdauer ΔT , welche von der Rotationsgeschwindigkeit des Laserscanners abhängt. Entscheidend für die Verschiebung ΔS und die Verdrehung ΔR ist dabei das Verhältnis zwischen Plattformgeschwindigkeit \dot{t} und Rotationsgeschwindigkeit des Laserscanners. Findet die Plattformbewegung langsam und konstant statt (Gleichung 5.2) und ist dabei gleichzeitig eine hohe Rotationsgeschwindigkeit eingestellt, ergeben sich nur geringe Werte für ΔS und ΔR . Ist dies nicht der Fall, so sollte die Bewegung zwischen den einzelnen Epochen mit betrachtet werden. Im Folgenden werden daher alle Punkte eines Profils aus ihrer 2D-Form in eine diskrete räumliche Form überführt. Dieser Prozess wird auch als Abwickeln bezeichnet. Die räumliche Kurve entspricht einer Helix, welche in der Abbildung 2.11 dargestellt ist.

5.2.1 Methode einer punktweisen Georeferenzierung

In diesem Abschnitt werden Ansätze für eine punktweise Georeferenzierung, welche die Bewegung der mobilen Plattform während der Profilmessung mit berücksichtigen, vorgestellt und diskutiert. Für eine punktweise Betrachtung ist zunächst der Zeitunterschied $\Delta \tau$ zwischen den einzelnen $n = 0 \dots (N - 1)$ Profilpunkten zu bestimmen. Zur Vereinfachung wird von einer konstanten Umlaufgeschwindigkeit des Profilscanners ausgegangen. Daraus folgt, dass die Größen ΔT und $\Delta \tau$ als konstant angesehen werden können. Wenn N die Anzahl der Punkte im Profil ist, so gilt

$$\Delta \tau = \frac{\Delta T}{N}.\tag{5.5}$$

Findet eine konstante Bewegung der Plattform statt (vergleiche Gleichung 5.2), so resultieren daraus gleichförmige Verschiebungen Δs_n bzw. Verdrehungen Δr_n zwischen den einzelnen Profilpunkten. Eine grafische Darstelltung erfolgt in der Abbildung 5.2.

Für die Interpolation zwischen den Zuständen (k-1) und (k) ergibt sich mit Hilfe des folgenden Zusammenhangs

$$\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{t}\\\boldsymbol{r}\end{bmatrix}_{r}^{b}\right)_{n}^{(k-1)} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{t}\\\boldsymbol{r}\end{bmatrix}^{(k-1)} + n \cdot \Delta \tau \cdot \left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{t}\\\boldsymbol{r}\end{bmatrix}^{(k)} - \begin{bmatrix}\boldsymbol{t}\\\boldsymbol{r}\end{bmatrix}^{(k-1)}\right).$$
(5.6)

Somit werden für jeden der einzelnen N Profilpunkte des Zustandes (k-1) unterschiedliche Transformationsparameter $(\begin{bmatrix} t & r \end{bmatrix}^T |_r^b)_n^{(k-1)}$ berechnet. Werden diese im Rahmen der Abwickelung verwendet, ergibt sich eine gleichförmige Helix. Hieraus resultiert eine gleichmäßige Punktverteilung.



Abbildung 5.2: Darstellung einer linearen und gleichförmigen Bewegung beim k-TLS, die Profilpunkte werden um gleichförmige Beträge Δx verschoben, es entsteht eine gleichförmige Helix.

Dies stellt jedoch eine eher idealisierte Herangehensweise dar. In der Realität ist eine konstante Bewegung sehr schwer zu realisieren. Hieraus resultieren hohe Anforderungen an den Aufbau der Plattform und an die Auswahl der Sensoren des MSS. Um eine solch idealisierte Bewegungsform zu verwirklichen, sind ein Antrieb und darüber hinaus Dämpfungselemente zu verwenden. Dieses Thema wird im Abschnitt 5.3.1 nochmals detaillierter aufgegriffen.

In der praktischen Umsetzung wird eine gleichförmige Bewegung jedoch nicht immer exakt umzusetzen sein. Das bedeutet, dass es auch zu unregelmäßigen Bewegungsformen kommt. Hierunter zählt beispielsweise die gleichmäßig beschleunigte Bewegung, vergleiche Gleichung 5.4. Liegen diese vor, so hat dies auch Auswirkungen auf die Abwickelung der Profilpunkte. Das Resultat ist eine Helix, welche nicht mehr gleichmäßig verläuft. Dies ist in der Abbildung 5.3 grafisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Lage der Profilpunke von den nun nicht mehr konstanten Verschiebun-

gen Δs_n und Verdrehungen Δr_n abhängt. Voraussetzung hierfür ist, dass alle verwendeten Größen, welche in den Gleichungen 5.3 und 5.4 vorliegen, verwendet werden. Die Interpolation erfolgt durch

$$\left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{t} \\ \boldsymbol{r} \end{bmatrix}_{\boldsymbol{r}}^{\boldsymbol{b}} \right)_{\boldsymbol{n}}^{(k-1)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{t} \\ \boldsymbol{r} \end{bmatrix}^{(k-1)} + \boldsymbol{n} \cdot \Delta \tau \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{\dot{t}} + 1/2 \cdot \Delta \tau \cdot \boldsymbol{\ddot{t}} \\ \boldsymbol{\dot{r}} + 1/2 \cdot \Delta \tau \cdot \boldsymbol{\ddot{r}} \end{bmatrix}^{(k-1)}.$$
(5.7)

Die Größen in den Vektoren $\dot{t}, \dot{t}, \dot{r}$ und \ddot{r} sind in diesem Fall zu berechnen. Sie können mit Hilfe der erfassten Beobachtungen, siehe Gleichung 5.1 und den Gleichungen 5.3 und 5.4 bestimmt werden. Alternativ können diese Größen auch mit Hilfe zusätzlicher Sensoren erfasst werden. Hierfür bieten sich z. B. Kameras oder IMU an. Sollen diese zusätzlich zu den Beobachtungen des Lasertrackers verwendet werden, so ist dies im Rahmen der Interpolation ohne eine zusätzlich Vorprozessierung (z. B. Mittelung oder Gewichtung) nicht möglich. Des Weiteren besteht bei der Interpolation keine Möglichkeiten Messunsicherheiten der Beobachtungen mit einzubeziehen. Diese müssen separat über VF bestimmt werden. Eine Möglichkeit, Daten aus mehreren Sensoren und die Messunsicherheiten im Rahmen einer einzelnen Prozessierung mitzuberücksichtigen, ist ein Filter. Das Filter



Abbildung 5.3: Darstellung einer unregelmäßigen bzw. beschleunigten Bewegung beim k-TLS, die Profilpunkte werden um nicht gleichförmige Beträge Δs verschoben, es entsteht eine ungleichmäßige Helix.

stellt ein mathematisches Verfahren zur iterativen Schätzung von Parametern zur Beschreibung von Systemzuständen (physikalichens Modell und Prozessrauschen) dar. Dies geschieht auf Basis von Beobachtungsgrößen bzw. deren Unsicherheiten (Beobachtungsrauschen). Daher liegt die Verwendung eines solchen Filters für die konkrete Umsetzung der punktweisen Georeferenzierung nahe.

5.3 Filtermodell

In diesem Abschnitt wird das verwendete Filtermodell, welches die punktweise Georeferenzierung unter Berücksichtigung des Bewegungsverhalten der mobilen Plattform mitberücksichtigt, beschrieben. Zunächst erfolgen einige Vorbetrachtungen, durch welche die Wahl des Filters begründet wird. Hierfür sind die Vorgaben entscheidend, welche sich aus dem Plattformaufbau und der Messumgebung ergeben. Darauf aufbauend wird die konkrete Implementierung des Filters beschrieben.

5.3.1 Vorbetrachtungen und Modellwahl

Wie bereits im Abschnitt 3.5.1 beschrieben, handelt es sich im Falle des KF um einen gängiges Verfahren für eine iterative Schätzung von Zuständen. Aus Abschnitt 3.5.1 ist zu entnehmen, dass das klassische KF nur für lineare Zusammenhänge gilt. Es ist anzumerken, dass dies auch auf den hier dargestellten Zusammenhang zutrifft. Daher wäre eine Prozessierung, welche auf ein lineares KF basiert eine übliche Vorgehensweise. Bei der hier erfolgten Umsetzung wird jedoch eine EKF ausgewählt. Der Grund hierfür basiert auf der Idee, dass für das verwendete k-TLS-basierte MSS noch weitere Sensoren für die Georeferenzierung verwendet werden sollen. Vorgesehen sind zusätzlich eine IMU und Kameras. Dadurch soll im Falle einer Unterbrechung der Sicht zwischen Lasertracker und T-Probe weiter eine Georeferenzierung möglich sein. Des Weiteren können diese Daten zur Stützung der Georeferenzierung verwendet werden. Für eine detailliertere Darstellung wird auf Trusheim (2018) verwiesen. Im Rahmen dieser Masterarbeit erfolgten auch mehrere Prozessierungen, welche die Verwendung weiterer Sensorik untersuchten. Bei den hier dargestellten Messungen ist dies nicht der Fall. Den wesentlichsten Unterschied des EKF im Vergleich zum KF, stellt die analytische Annäherung durch Linearisierung der Beobachtungs- und der Systemgleichungen mit Hilfe einer Reihenentwicklung nach Taylor dar. Dieser Vorgang ist in der Abbildung 5.4 dargestellt. Aus der mittleren Abbildung ist ersichtlich, dass durch die vorhandene Nichtlinearität die Voraussetzung einer Normalverteilung nicht mehr gegeben ist. Um diese wesentliche Forderung, vergleiche Abschnitt 3.5.1, wiederherzustellen, wird eine Linearisierung durchgeführt. An der rechten Abbildung wird deutlich, dass die Linearität wieder gegeben ist. Jedoch ist auch ersichtlich, dass die tatsächliche Verteilung verfälscht wird.



Abbildung 5.4: Links: linearer Zusammenhang führt zu normalverteilter Abbildung, Mitte: Nichtlinearer Zusammenhang führt zu nicht mehr normalverteilter Abbildung, somit ist KF nicht mehr anwendbar, Rechts: Linearisierung um aktuellen Zustand führt wieder zu normalverteilter Abbildung (Solà, 2014, S. 13).

Einen weiterer Aspekt, welcher bei der Wahl des Filters bzw. bei dessen Erweiterung zu betrachten ist, ist die Bewegungform der Plattform. Wie im Abschnitt 2.7.4 angedeutet, kann diese im Falle von k-TLS sehr dynamisch erfolgen. Maßgebliche Faktoren hierfür sind zum einen die Messumgebung und zum anderen der Aufbau der mobilen Plattform. Erfolgt deren Bewegung konstant und gleichmäßig, so kann das verwendete Bewegungsmodell für das Filters stark vereinfacht werden. Wie bereits im Abschnitt 5.2.1 erwähnt, resultieren hieraus jedoch hohe Anforderung an den Aufbau der Plattform und an das Messkonzept. Wie im Abschnitt 2.1 beschrieben sind die örtlichen Gegebenheiten in der Produktion von industriellen Großstrukturen zum Teil sehr komplex und anspruchsvoll. Daher wird eine flexibel einsetzbare Plattform mit stabilisierende Elementen bevorzugt. Eine solche Umsetzung ist in der Abbildung 5.3 dargestellt. Hier wurde eine modulare Trägerplattform entwickelt. Am unteren Teil können der Laserscanner und die T-Probe montiert werden. An der Plattform (Seilschlitten) sind auf beiden Seiten je drei Rollen angebracht. Dadurch wird eine Aufhängung der Plattform an zwei Seilen ermöglicht. Die Position der mittleren Rollen ist dabei variabel einstellbar. Dadurch kann das Laufverhalten der Plattform angepasst werden. Dies kann im Zusammenhang mit der Seilspannung erfolgen. Am unteren Ende der Plattform sind Dämpfungselemente, welche aus mehreren Cavoflex Drahtseil-Federdämpfern bestehen, angeordnet. Der Rollwagen, vergleiche linke Seite der Abbildung 5.3, wird so konstruiert, dass der Seilschlitten mit dem oberen Teil verbunden werden kann. Dies ermöglicht zum einen den vereinfachten Transport des Seilschlittens inklusive adaptiertem Scanner und zum anderen ist ein schneller Wechsel zwischen beiden Trägersystemen möglich. Der Seilschlitten kann dabei mit einem elektrischen Antrieb erweitert werden. Hierdurch kann eine konstante Geschwindigkeit vorgeben werden, was eine Annäherung an eine ideale lineare Bewegung ermöglicht (Hartmann u. a., 2021).

Trotz aller Entwicklungen bei der Plattform und eine bestmögliche Optimierung bei der Messumgebung, werden unterschiedliche überlagernde Bewegungsformen, wie z. B. Vibrationen oder Pendelbewegungen nur schwer zu vermeiden sein. Hieraus resultiert eine höhere Dynamik bei der Plattformbewegung, welche sich auf die k-TLS-basierte Objekterfassung auswirkt. Daher stellt der



Abbildung 5.5: Darstellung einer mit Schockdämpfern (Drahtwickeln) modular aufgebauten Plattform für die k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung, rechte Seite Seil-getragene Konstruktion, linke Seite Integration der Konstruktion auf einem Rollwagen (Hartmann u. a., 2021).

Einsatz von zusätzlicher Sensorik eine gängige Vorgehensweise dar. Dies wird auch zu komplexeren funktionalen Zusammenhängen führen, welches zum Teil eine höhere Nichtlinearität nach sich ziehen kann. Daher erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die Implementierung als iEKF. Die mathematischen Zusammenhänge sind im Abschnitt 3.5.3 beschrieben. Auf die Implementierung wird im folgenden Abschnitt 5.3.2 eingegangen.

5.3.2 Implementierung

In diesem Abschnitt wird die Implementierung eines Filtermodells für die punktweise Georeferenzierung aller durch das k-TLS-basierte MSS erfassten Profilpunkte beschrieben. Wie im Abschnitt 3.5.1 erwähnt, besteht das Filter aus den Schritten *Prädiktion* und *Filterung*. Hierbei werden der physikalische Zusammenhang des Systemzustandes $f_{k-1}(\cdot)$ (vergleiche Gleichung 5.13) und der Zusammenhang zwischen den Zuständen und den gemessenen Beobachtungen $h_k(.)$ (vergleiche Gleichung 5.14) miteinander kombiniert. Im Falle einer konkreten Umsetzung wird dem Ganzen noch eine *Initialisierung* vorgeschaltet. Hierbei werden Startwerte gesetzt. Des Weiteren müssen vorab Angaben getroffen werden, welche das Beobachtungs- und Prozessrauschen definieren. Dies wird im Folgenden beschrieben.

Aufstellung von Beobachtungs- und Prozessrauschen

Die VKM Q_{ww} , durch welche des Prozessrauschens des Systems beschrieben wird, ist in der Regel unbekannt. Daher müssen für die Bestimmung bzw. Modellierung teilweise umfangreiche Untersuchungen getätigt werden. Ist jedoch festzuhalten, dass diese einen erheblichen Einfluss auf den Prädiktion hat. Daher muss die Aufstellung von Q_{ww} sehr sorgfältig erfolgen. Eine Methode besteht darin, die höchste Ordnung der Parameter, im konkreten Fall sind es die Beschleunigungen \ddot{x} und \ddot{r} , in den Systemzuständen als konstant über die Zeit $\Delta \tau$ zu betrachten. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es hierbei zu unkorrelierten Sprüngen in den jeweiligen Parametern zwischen den Epochen führen kann. Die Parameter niedriger Ordnung werden mit einem weißen Rauschen in Abhängigkeit vom Parameter höchster Ordnung versehen. Das Prozessrauschen ist gegeben durch

$$\boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{w}\boldsymbol{w}} = \begin{bmatrix} \iota_t \cdot \boldsymbol{\varpi} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \iota_r \cdot \boldsymbol{\varpi} \end{bmatrix}.$$
(5.8)

Die beiden Parameter ι wurden experimentell in den Arbeiten von Trusheim (2018) ermittelt und wie folgt gewählt $\iota_t = 5, 3$ bzw. $\iota_r = 0, 4$. Sie werden als gewichtende Faktoren für die Translationen und Rotationen verwendet. Ihre Größenordnung leitet sich aus den maximal möglichen Beschleunigungsinkrement, welches über die Abtastperiode zu erwarten ist, ab, vergleiche hierfür Bar-Shalom u. a. (2007, S. 275). Darüber hinaus wird in Bar-Shalom u. a. (2007, S. 274) das Wiener-Sequenz-Beschleunigungsmodell vorgestellt. Hierin wird angenommen, dass die Bestimmung der Beschleunigungen unabhängig ist und daher als weißes Rauschen definiert ist. Die führt zur folgenden Struktur

$$\boldsymbol{\varpi} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta\tau^4}{4} & 0 & 0 & \frac{\Delta\tau^3}{2} & 0 & 0 & \frac{\Delta\tau^2}{2} & 0 & 0\\ 0 & \frac{\Delta\tau^4}{4} & 0 & 0 & \frac{\Delta\tau^3}{2} & 0 & 0 & \frac{\Delta\tau^2}{2} & 0\\ 0 & 0 & \frac{\Delta\tau^4}{4} & 0 & 0 & \frac{\Delta\tau^3}{2} & 0 & 0 & \frac{\Delta\tau^2}{2}\\ \frac{\Delta\tau^3}{2} & 0 & 0 & \Delta\tau^2 & 0 & 0 & \Delta\tau & 0\\ 0 & \frac{\Delta\tau^3}{2} & 0 & 0 & \Delta\tau^2 & 0 & 0 & \Delta\tau & 0\\ 0 & 0 & \frac{\Delta\tau^3}{2} & 0 & 0 & \Delta\tau^2 & 0 & 0 & \Delta\tau\\ \frac{\Delta\tau^2}{2} & 0 & 0 & \Delta\tau & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & \frac{\Delta\tau^2}{2} & 0 & 0 & \Delta\tau & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & \frac{\Delta\tau^2}{2} & 0 & 0 & \Delta\tau & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
(5.9)

Die Matrix Q_{ll} beinhaltet die Unsicherheiten der einzelnen Beobachtungen, welche im Beobachtungsvektor dargestellt sind, vergleiche Gleichung 5.1. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Bezeichnung Q_{ll} in der klassischen Ausgleichungsrechnung für die Kofaktormatrix steht. Durch Hinzunahme des Varianzfaktors σ_0^2 ergibt sich die VKM, welche die Varianzen und Kovarianzen enthält. Für das hier durchgeführte Filter gilt $\sigma_0^2 = 1$. Daher kann Q_{ll} direkt verwendet werden und ergibt sich aus

$$\boldsymbol{Q_{ll}} = diag(\sigma_{t_X}^2, \sigma_{t_Y}^2, \sigma_{t_Z}^2, \sigma_{r_X}^2, \sigma_{r_Z}^2, \sigma_{r_Z}^2).$$
(5.10)

Die in Q_{ll} eingeführten Standardunsicherheiten wurden aus den Angaben des Datenblattes Hexagon (2022a) abgeleitet. Für typische Werte sind die angegebenen MPE-Werte zu halbieren, vergleiche Hexagon (2022a). Die Standardunsicherheiten der Translationen $\sigma_{t_X}^2, \sigma_{t_Y}^2, \sigma_{t_Z}^2$ wurden über VF ermittelt. Da für die T-Probe keine Angaben der Rotationen $\sigma_{r_X}^2, \sigma_{r_Y}^2, \sigma_{r_Z}^2$ vorliegen, wurden die Werte einer Leica T-Mac verwendet. Dies ist vertretbar, da sich das Messprinzip und der Aufbau des Sensors nicht wesentlich unterscheiden. Eine Zusammenstellung der Herstellerangaben ist in der Tabelle 2.7 gegeben. Da das Ergebnis hinsichtlich seiner Art und Verteilung nicht exakt zu interpretieren ist, wird an dieser Stelle die Vorgehensweise nach GUM aufgegriffen, vergleiche Gleichung 3.25. Als Ergebnis stehen die Standardunsicherheiten der Messparameter zur Verfügung, für welche die Normalverteilung angenommen werden kann.

Prädiktion

Die Prädiktion wird verwendet, um Zustände, mit diskreter Schrittweite, vorherzusagen. Im konkreten Fall erfolgt dies zwischen den einzelnen *i* Profilpunkten. Als Schrittweite wird die Zeitdifferenz $\Delta \tau$ zwischen den aufeinander folgenden Profilpunkten verwendet, vergleiche Gleichung 5.5. Der grundlegende Ansatz der Prädiktion ist in der Gleichung 3.100 gegeben. Ein Bestandteil ist der Vektor $\boldsymbol{u}^{(k-1)}$. Hierin können bekannte System-beschreibende Parameter eingeführt werden. Beispielhaft sind hier deterministische Veränderungen des Systems oder die Änderung der Plattformbewegung zu nennen. Da hierüber im Vorfeld der Prozessierungen keine genauen Kenntnisse vorliegen, wird auf die Einführung des Vektors $u^{(k-1)}$, verzichtet. Es gilt somit

$$\boldsymbol{x}^{(k)} = \boldsymbol{f}_{k-1}(\boldsymbol{x}^{(k-1)}, \boldsymbol{w}^{(k-1)}).$$
(5.11)

Der Vektor $\boldsymbol{w}^{(k-1)}$ stellt das Systemrauschen dar. Des Weiteren ist der Zustandsvektor $\boldsymbol{x}^{(k)}$, welcher für die Epoche k gilt zu definieren. Es gilt

$$\boldsymbol{x}^{(k)} = [\boldsymbol{t}^{(k)}, \boldsymbol{\dot{t}}^{(k)}, \boldsymbol{\ddot{r}}^{(k)}, \boldsymbol{\dot{r}}^{(k)}, \boldsymbol{\ddot{r}}^{(k)}]^{T}.$$
(5.12)

Der Zustandsvektor beinhaltet zum einen die Beobachtungen des Lasertrackers. Das sind zum einen die Translationen $t^{(k)}$ und die Rotationen $r^{(k)}$, siehe Gleichung 5.1. Des Weiteren sind die Geschwindigkeiten $\dot{t}^{(k)}$ und Beschleunigungen $\ddot{t}^{(k)}$, sowie die Winkelgeschwindigkeiten $\dot{r}^{(k)}$ integriert. Alle Größen sind hier jeweils als Vektor dargestellt, sie beinhalten je drei Komponenten, welche in bzw. um die X-,Y-,Z-Richtung wirken. Eine Besonderheit, stellt die Hinzunahme der Winkelbeschleunigungen $\ddot{\mathbf{r}}^{(k)}$ dar. Dies ist durch das zu erwartenden Bewegungsverhalten zu begründen. Grund hierfür ist die einfache Gestaltung der verwendeten Plattformen, vergleiche Abschnitt 5.3.1. Hieraus resultiert, dass unterschiedlichste Bewegungformen auftreten können. Um eine mögliche höhere Dynamik der Plattform entsprechend zu berücksichtigen, werden zusätzlich die Winkelbeschleunigungen \ddot{r} in den Zustandsvektor eingeführt. Somit wird sichergestellt, dass die Rotationen nicht durch konstante Winkelgeschwindigkeiten begrenzt werden (Pentenrieder, 2005). Analog werden auch die Übergangsmatrix $\mathbf{\Phi}^{(k-1)}$, siehe Gleichung 3.107, und das physikalische Modell entsprechend erweitert. Aufgrund der möglichen unterschiedlichsten Bewegungformen wird das physikalische Modell allgemein gehalten. Des Weiteren werden die Translationen und Rotation unabhängig von einander betrachtet, was einer omnidirektionalen Bewegungsform entspricht. Unter Betrachtung einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung, vergleiche Gleichung 5.4, ergibt sich somit das Systemmodell des Filters aus

$$\boldsymbol{x}^{(k)} = \boldsymbol{f}_{k-1}(\boldsymbol{x}^{(k-1)}, \boldsymbol{w}^{(k-1)}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{t}^{(k-1)} + \Delta \tau \cdot \boldsymbol{\dot{t}}^{(k-1)} + \frac{1}{2} \cdot \Delta \tau^2 \cdot \boldsymbol{\ddot{t}}^{(k-1)} \\ \boldsymbol{\dot{t}}^{(k-1)} + \Delta \tau \cdot \boldsymbol{\dot{t}}^{(k-1)} \\ \boldsymbol{\ddot{t}}^{(k-1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \boldsymbol{t}^{(k-1)} + \Delta \tau \cdot \boldsymbol{\dot{t}}^{(k-1)} \\ \boldsymbol{\dot{t}}^{(k-1)} + \Delta \tau \cdot \boldsymbol{\dot{r}}^{(k-1)} \\ \boldsymbol{\dot{r}}^{(k-1)} + \Delta \tau \cdot \boldsymbol{\ddot{r}}^{(k-1)} \\ \boldsymbol{\ddot{r}}^{(k-1)} \end{pmatrix} \right] \cdot (5.13)$$

Die Prädiktion ergibt sich aus der Durchführung der Schritte, welche in den Gleichungen 3.107 - 3.110, dargestellt sind.

Filterung

Beim Filterschritt wird der Zustandsvektor durch die neuen Beobachtungen der Epoche k aufdatiert. Hierbei stellen die zur Epoche k getätigten Beobachtungen des Lasertrackers, vergleiche Gleichung 5.1, direkt gemessenen Größen im Zustandsvektor dar. Der Zusammenhang zwischen Beobachtungs- und Zustandsraum wird durch die Gleichung 3.111 hergestellt. Es gilt

$$l^{(k)} = \mathbf{h}_k(\boldsymbol{x}^{(k)}, \boldsymbol{v}^{(k)}).$$
(5.14)

Der Beobachtungsvektor $l^{(k)}$ ergibt sich somit aus der Funktion $h_k(.)$. In diese gehen der Zustandsvektor $\boldsymbol{x}_+^{(k)}$ und der Vektor $\boldsymbol{v}^{(k)}$ ein. Der Vektor $\boldsymbol{v}^{(k)}$ beinhaltet das Beobachtungsrauschen. Dieses Rauschen wird als weißes Rauschen angenommen und es gilt die Normalverteilung $\boldsymbol{v}^{(k)} \sim N(\mathbf{0}, \boldsymbol{Q}_{ll}^{(k)})$. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass für die aktuellen Beobachtungen

aus $l^{(k)}$ der Zustandsvektor $x_{+}^{(k)}$ gilt, vergleiche hierzu auch die Abbildung 3.5. Es gilt

$$\boldsymbol{l}^{(k)} = \boldsymbol{h}_{k}(\boldsymbol{x}_{+}^{(k)}, \boldsymbol{v}^{(k)}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{t}^{(k)} + \boldsymbol{v}_{t^{(k)}} \\ \boldsymbol{r}^{(k)} + \boldsymbol{v}_{r^{(k)}} \end{bmatrix}.$$
(5.15)

Der Filterung erfolgt iterativ mit Hilfe der Gleichungen 3.116 - 3.121. Die Berechnung wird abgebrochen, wenn die relative Änderung des gefilterten Zustandsvektors den Wert 10^{-8} unterschreitet. Für die erste Iteration (i = 1) gilt $\hat{x}_{i,+}^{(k)} = \hat{x}_{-}^{(k)}$. Abschließend ergibt sich der neue Zustandsvektor, siehe Gleichung 3.120 und die dazugehörige VKM, siehe Gleichung 3.121.

Initialisierung

Zur Initialisierung des Filters werden Startwerte für den Zustandsvektor $\hat{x}^{(0)}_+$ und für die zugehörige VKM $Q^{(0)}_{\hat{x}\hat{x},+}$ definiert. In den Zustandsvektor, vergleiche Gleichung 5.12, werden die am Beginn der Messung (Epoche k = 0) erfassten Translationen $t^{(0)}$ und Rotationen $r^{(0)}$ eingeführt. Für die Geschwindigkeit, Beschleunigung, Winkelgeschwindigkeit und die Winkelbeschleunigung liegen für die ersten Epoche keine genauen Werte vor. Da die Messungen aus einem nahezu ruhenden Zustand starten, werden die Vektoren $\dot{t}^{(0)}, \, \dot{r}^{(0)}$ und $\ddot{r}^{(0)}$ mit Nullwerten gefüllt. Hieraus resultiert der folgende Zustandsvektor für die Startepoche

$$\boldsymbol{x}^{(0)} = \left[\boldsymbol{t}^{(0)}, \boldsymbol{0}, \boldsymbol{0}, \boldsymbol{r}^{(0)}, \boldsymbol{0}, \boldsymbol{0}\right]^{T}.$$
(5.16)

Die VKM $Q_{\hat{x}\hat{x},+}^{(0)}$ wird näherungsweise aufgestellt, wobei für die direkten Beobachtungen die geringste Varianz in Bezug zur Messgenauigkeit angenommen wird. Darüber hinaus wurden alle Kovarianzen mit Null angenommen. Da die Startwerte in den Filterschritten verbessert werden, müssen sie nicht zwingend korrekt gewählt werden.

Glättung

Um die Abweichungen (Unsicherheiten) bei der Bestimmung des Systemzustandes $x^{(k)}$ zum Zeitpunkt (k) zu verringern, kann optional eine Glättung, welche auch als Smoother bezeichnet wird, durchgeführt werden. Die Prozessierung ist nur im Postprozessing möglich. Das wesentliche Ziel der Glättung ist ein Verringerung der Unsicherheit, welche bei der Bestimmung des Systemzustandes auftritt. Bei der Glättung wird zunächst das Filter, wie vorab beschrieben, einmal vorwärts prozessiert. Im Anschluss hieran wird das Filter erneut rückwärts angewendet. Hierzu müssen die Beobachtungen invertiert werden. Die Startwerte x_0 und Q_{xx_0} für das rückwärts berechnete Filter werden dabei der letzten Iteration des vorwärts gerichteten Filters entnommen. Der Vorteil ist, dass hierdurch die Informationen über das Systemverhalten, welche aus dem Hinweg ermittelt wurden, entsprechen verwendet werden.

Bei der Prozessierung im Rahmen dieser Arbeit erfolgte eine Glättung. Da bei den Messungen die Fahrt mit einer Standphase endet, können die Geschwindigkeiten für das rückwärts angewandte Filter zu Null gesetzt werden. Aus der beidseitigen Filterung ergeben sich zu jeder Beobachtung zwei Zustandsvektoren. Diese können gemittelt, oder auf Grundlage ihrer in der Spur der VKM berechneten Standardabweichung kombiniert werden. Bei der Kombination der Zustandsvektoren werden die Geschwindigkeiten und Winkelgeschwindigkeiten des rückwärts gerichteten Filters mit negativ Vorzeichen im Vergleich zum Vorwärtsfilter gesetzt. Dies ist in der Gleichung 5.17 dargestellt. Der vorwärts gerichtete Filter wird mit vw und der rückwärts gerichtete Filter mit rw (1) (1)

bezeichnet. Die Bezeichnung glsteht für den geglätteten Zustandsvektor.

$$\boldsymbol{x}_{gl}^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\boldsymbol{t}_{vw}^{(k)} + \boldsymbol{t}_{rw}^{(k)}}{2} \\ \frac{\boldsymbol{t}_{vw}^{(k)} - \boldsymbol{i}_{rw}^{(k)}}{2} \\ \frac{\boldsymbol{t}_{vw}^{(k)} + \boldsymbol{i}_{rw}^{(k)}}{2} \\ \frac{\boldsymbol{t}_{vw}^{(k)} + \boldsymbol{i}_{rw}^{(k)}}{2} \\ \frac{\boldsymbol{t}_{vw}^{(k)} + \boldsymbol{r}_{rw}^{(k)}}{2} \\ \frac{\boldsymbol{t}_{vw}^{(k)} - \boldsymbol{t}_{rw}^{(k)}}{2} \\ \frac{\boldsymbol{t}_{vw}^{(k)} - \boldsymbol{t}_{rw}^{(k)}}{2} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$
(5.17)

5.4 Messprozess und Datenauswertung

In diesem Abschnitt wird die praktische Umsetzung beschrieben. Zunächst wird die messtechnische Durchführung erläutert. Im Anschluss hieran erfolgt die Darstellung und Interpretation der Daten. Die Validierung der georeferenzierten Punktwolken erfolgt durch Referenzdaten, welche durch einen Lasertracker (Leica AT901) und einer T-Scan erfasst wurden. Für die verwendete Filterlösung, vergleiche hierfür Abschnitt 5.3.2, werden zusätzlich das Bewegungsverhalten und die berechnete Innovation analysiert.

5.4.1 Messtechnische Umsetzung

Um die vorgestellte Implementierung des Filtermodells zu testen und zu validieren, werden Testmessungen durchgeführt. Hierfür werden zunächst das Objekt und die örtlichen Umgebung vorgestellt. Darüber hinaus werden die verwendeten mobilen Plattformen dargestellt. Zum Einsatz kommen ein Rollwagen und ein Seilschlitten. Abschließend wird die Durchführung der Messungen beschrieben.

Objekt und Umgebung

Als Messobjekt wird ein Mockup mit einer Länge von ca. 8 m und eine Höhe von ca. 4 m verwendet. Das Mockup ist in der Abbildung 5.6 dargestellt. Es hat einige schiffstypische Merkmale. Dies sind je zwei Bullaugen, welche rund bzw. oval sind und eine Scheuerleiste, siehe längliches zylinderförmiges Element in der Abbildung 5.6. Das Mockup steht unter einem Vordach, wodurch annähernd konstante äußere Bedingungen herrschen. Der Boden besteht aus Betonplatten, zwischen denen Dehnungsfugen von 1-2 cm liegen. In direkter Nähe zum Mockup wurde ein Drahtseil gespannt. Das Seil wurde so befestigt, dass ein Höhenunterschied von ca. 0,3 m zwischen dem Start- und Endpunkt vorliegt. Die Gesamtlänge beträgt ca. 10 m. Das Seil wurde so gespannt, dass es einen leichten Durchhang hat. Des Weiteren sind an der Rändern des Mockup neun magnetische Nester angebracht. Diese stellen Referenzpunkte dar, welche ein lokales Referenznetz r realisieren. Die Lage von r ist in der Abbildung 5.6 dargestellt. Zur Realisierung der Referenzpunkte wurde das in der Abbildung 2.8 vorgestellte Konzept verwendet, bei welchem die Nester wahlweise mit CCR oder Schwarz-/Weiß-Zielzeichen bestückt werden können. Hierdurch ist eine abschließende Validierung der erfassten k-TLS-Datensätze mit Referenzdaten möglich.

Mobile Plattformen

Im Rahmen der Testmessungen werden zwei unterschiedliche mobile Plattformen verwendet. Diese sind in der Abbildung 5.7 dargestellt. Als mobile Plattformen kommen ein Rollwagen und ein Seilschlitten zum Einsatz. In beiden Fällen wird der Laserscanners so fixiert, dass keine Drehung um die eigene Stehachse möglich ist. Daraus folgt, dass die Messungen mit dem Laserscanner ausschließlich im Profilmodus stattfinden. Im Folgenden werden die mobilen Plattformen kurz vorgestellt.



Abbildung 5.6: Darstellung des Mockups: linke Seite Mockup mit neun Referenzpunkten (Schwarz-/Weiß-Zielzeichen) und Lage des Referenzkoordinatensystems r, rechte Seite Mockup und die ungefähren Trajektorien der k-TLS-Messungen.

Rollwagen: Hierbei handelt es sich um ein Stativ, welches auf einem beweglichen Untergrund mit drei Rädern aus Vollgummi montiert ist, vergleiche linke Darstellung der Abbildung 5.7. Die Räder haben eine Durchmesser von 10 cm und eine Breite von 2 cm. Über Gelenke sind die Räder jeweils um 360° um die vertikale Achse verschwenkbar. Dadurch ist eine omnidirektionale Bewegung in der Horizontalen möglich. Unter Annahme das der Untergrund und der Laserscanner horizontal sind, ist lediglich eine Rotation um die vertikale Achse (Z_r) möglich. Des Weiteren können nur Translationen in X_r und Y_r erfolgen. Da der Rollwagen keine mechanischen Stabilisatoren bzw. dämpfenden Elemente enthält, nimmt der Untergrund direkten Einfluss auf den Laserscanner. Im konkreten Fall betrifft dies vorallem die Dehnungsfugen zwischen den Betonplatten, siehe linke Darstellung in der Abbildung 5.7. Die Dehnungsfugen haben eine Breite von 2-3 cm. Beim Überqueren dieser kommt es zu einen abrupten Schlag, welcher sich vor allem in der vertikale Richtung auswirkt.

Seilschlitten: Hierbei handelt es sich um einen aus Metall gefertigten Rahmen, welcher den Laserscanner mit montierter T-Probe aufnimmt, siehe rechte Darstellung der Abbildung 5.7. Am oberen Ende des Rahmens ist eine Aufhängung montiert. Diese besteht aus zwei Kunststoffrollen mit einem Durchmesser von ca. 5 cm. Der Abstand zwischen den beiden Rollen beträgt ca. 10 cm. Über die Kunststoffrollen kann der Seilschlitten über eine Drahtseil bewegt werden. Die Translation kann somit nur in Richtung des Seils erfolgen. Durch die einfache Aufhängung über zwei Punkte kann jedoch eine leichte seitliche Auslenkung (Pendeln) nicht ausgeschlossen werden. Weitere Aspekte stellen die eingangs erwähnte leicht schräge Aufhängung und die Spannung des verwendeten Drahtseils dar. Durch den vorhanden Höhenunterschied wird die Plattform beschleunigt. Daher muss der Operateur innerhalb der Messfahrt mit Ausnahme des Starts und des Endes (Abbremsen) nicht eingreifen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Rollwagen sehr flexibel bewegt werden kann. Es wird jedoch ein fester möglichst ebener Untergrund benötigt. Des Weiteren wirken sich Störstellen und Hindernisse auf dem Boden negativ auf die Funktionalität aus. Dies kann mit dem Seilschlitten umgangen werden. Hier ist jedoch das Seil vorab zu befestigen und entsprechend zu spannen. Darüber hinaus ist diese Art anfällig für Schwingungen. Hier kann jedoch durch die Seilspannung und durch den Aufbau der Plattform entgegen gewirkt werden, vergleiche aus Abschnitt 5.3.1



Abbildung 5.7: Darstellung der verwendeten mobilen Plattformen, linke Seite Rollwagen und rechte Seite Seilschlitten, je mit Laserscanner (Z+F IMAGER 5010) und Leica T-Probe.

Messungen

Die messtechnische Umsetzung der k-TLS-basierten Objekterfassung erfolgte nach der im Abschnitt 2.7 beschriebenen Vorgehensweise. Als Laserscanner wird ein Z+F IMAGER 5010 verwendet. Die gewählten Parameter der Messungen sind in der Tabelle 5.1 aufgelistet. Es wird je eine Messung mit dem im Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Rollwagen und Seilschlitten durchgeführt.

Tabelle 5.1: Übersicht über die Plattformen und die Parameter der TLS-Messungen am Mockup.

						-
mobile	Drehrate	Messrate	Anz. Pixel	Anz.	Anz.	Differenz
Plattform	[rps]	Laser [Hz]	pro Profil	Geo.ref.	Profile	Geo.ref Profile
Rollwagen	50	508k	10000	2791	2786	5
Seilschlitten	50	1016k	20000	1028	1023	5

Für die Drehrate wurde der maximal mögliche Wert von 50 rps gewählt. Der Grund hierfür ist, dass trotz einer schnellen Plattformbewegung eine möglichst hohe Punktdichte am Objekt erreicht wird. Bei beiden Messungen wurden je fünf Georeferenzierungsmessung mehr als Profile erfasst. Als Grund hierfür wird vermutet, dass der Laserscanner vor und nach den Profilmessungen einige Triggersignale sendet. Die genaue Zuordnung erfolgte nach dem im Abschnitt 2.7.2 beschriebene Vorgehensweise. Die Systemkalibrierung erfolgte vorab. Die Vorgehensweise entspricht der im Abschnitt 4.4.2 beschriebenen. Des Weiteren wurden die neun am Rand des Mockup befestigten Referenzpunkte mit dem Lasertracker angemessen. Diese ermöglichen es, die erfassten k-TLS-Daten in das übergeordnete r zu transformieren.

5.4.2 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der prozessierten k-TLS Daten dargestellt und interpretiert. Dies erfolgt zum einen durch eine Validierung. Eine naheliegende Vorgehensweise ist, dies auf Basis einer Referenztrajektorie durchzuführen. Jedoch ergibt sich hierbei für den konkreten Fall das Problem, dass die Referenzdaten für die Trajektorien nur sehr schwer bestimmbar sind. Dies liegt daran, dass die Genauigkeiten des verwendeten Lasertrackers (Leica AT960), vergleiche Tabelle 2.7, im Vergleich zu anderen Sensoren, sehr hoch sind. Daher wird hier für die Validierung eine andere Strategie verfolgt. Diese basiert auf einem Vergleich zwischen den georeferenzierten k-TLS Punktwolken und Referenzdaten. Zweiterer Datensatz wird mit Hilfe eines Leica AT901 und einer Leica T-Scan erfasst. Beide Datensätze liegen im übergeordneten Referenznetz r vor. Der Referenzdatensatz umfasst ca. 15 Mio Punkte und deckt damit ca. 70% des Mockup ab. Es fehlen lediglich einige der oberen Bereiche, vergleiche hierzu z. B. die Abbildung 5.8. Die Genauigkeit mit welcher eine ebene Oberfläche mit der T-Scan erfasst werden kann, beträgt $U_P = 95 \ \mu m + 3$ µm/m. Dieser Wert wird vom Hersteller als MPE spezifiziert, vergleiche Hexagon (2013). Hieraus folgt eine um den Faktor zehn höhere Genauigkeit im Vergleich zum verwendeten k-TLS-basierten MSS. Die Punktentfernung der Referenzmessung mit der Leica T-Scan wird mit 0,07 - 0,98 mm angegeben. Die Messfrequenz der einzelnen Zeilen beträgt max. 140 Linien pro Sekunde (Hexagon, 2013). Daraus resultiert, dass neben der höheren Genauigkeit eine deutlich detaillierte Objekterfassung (Auflösung) möglich ist. Die Punktdichte der hier vorliegenden Referenzpunktwolke ist jedoch nicht konstant. Dies ist damit zu begründen, dass die Messung mit dem Leica T-Scan händisch erfolgte. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Punktabstände zum Teil deutlich unterhalb von 1 mm liegt.

Im Falle der hier durchgeführten Punktwolken-basierten Validierung ist anzumerken, dass die k-TLS Daten auch Unsicherheiten aus anderen Teilschritten enthalten. Zu nennen sind hier z. B. die Systemkalibrierung und die Objekterfassung mit dem Laserscanner. Auf diese wird im Rahmen des Kapitel 6 detaillierter eingegangen. Zur Bewertung der Qualität, werden die Distanzen zwischen den k-TLS Daten und den Referenzdaten berechnet. Dies erfolgt nach dem in Lague u. a. (2013) publizierten M3C2-Algorithmus. Die Georeferenzierung der k-TLS-Daten erfolgt dabei nach den folgenden unterschiedlichen Prozessierungsmethoden:

- ohne Bewegungsmodell,
- lineare Interpolation (siehe Gleichung 5.6) und
- mit iEKF (Glättung).

Bei der ersten Methode erfolgt die Georeferenzierung der Profile (Epochen) ausschließlich basierend auf den erfassten 6 DoF, vergleiche Gleichung 5.1. Bei den weiteren Methoden wird die Bewegung zwischen den gemessenen Epochen mitberücksichtigt. Dies erfolgt zum einen durch eine lineare Interpolation, vergleiche Gleichung 5.6. Außerdem wird die Georeferenzierung mit einem iEKF prozessiert, vergleiche hierzu Abschnitt 5.3.2. Die Filterung erfolgt dabei vorwärts als auch rückwärts (Glättung). Im Falle des iEKF werden zusätzlich die Prädiktion und das Bewegungsmodell analysiert. Hierzu werden die berechneten Innovation betrachtet, vergleiche Gleichung 3.104. Diese wird für jeden der beobachteten Parameter (siehe Gleichung 5.1) berechnet. Für die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse wird im Folgenden in die beiden Plattformen Rollwagen und Seilschlitten unterschieden. Prozessiert werden die beiden in der Tabelle 5.1 angegebenen k-TLS-Messfahrten.

Rollwagen

Die Messung mit dem Rollwagen erfolgte ca. 45° zum Mockup, siehe Abbildung 5.6. Die Messentfernung steigt dabei von ca. 3 auf 7 m an. Der Wagen wird durch langsames Schieben fortbewegt. Hierbei werden Geschwindigkeiten \dot{t} im Bereich von 0,1 - 0,2 m/s erreicht. Die Winkelgeschwindigkeiten \dot{r} liegen meist im Bereich < 0,1 rad/s. In einigen Fällen erreichen diese jedoch Werte bis 0,2 rad/s. Eine Abbildung der Werte des Zustandsvektors erfolgt in den Abbildungen A.1 bzw. A.2. Hierin sind auch die ruckartigen Beschleunigungen zu erkennen, siehe z. B. Sprünge beim Parameter t_Z und den erhöhten Werten \dot{r}_Z bzw. \ddot{r}_Z . Diese sind auf das Überfahren der Dehnungsfugen zwischen den Betonplatten zurückzuführen. Hierbei gerät das Rad des Wagens in die Fuge, was ein ruckartiges Absacken verursacht. Aufgrund der fehlenden Dämpfung wirkt sich diese direkt auf die k-TLS-Messung aus. Aus der verwendeten Drehrate von 50 rps resultiert eine Zeitdifferenz $\Delta T = 0,02$ s zwischen zwei Zuständen (Profilen). Hieraus ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s eine Verschiebung von 4 mm. Beträgt die Winkelgeschwindigkeit 0,2 rad/s, so ergibt sich bei einer Messentfernung von 5 m eine Verschiebung von 20 mm. Hieraus wird deutlich, dass die Rotationen einen größeren Einfluss haben.



Abbildung 5.8: Berechnete M3C2-Distanzen zwischen T-Scan und k-TLS-Rollwagen ohne Bewegungsmodell, Werte in [mm].

In den Abbildungen 5.8 - 5.10 werden die berechneten M3C2-Distanzen zwischen Referenzdaten (T-Scan) und dem k-TLS-Datensatz mit dem Rollwagen dargestellt. Bei den Ergebnissen in der Abbildung 5.8 wurde kein Bewegungsmodell verwendet. Hierin sind mehrere linienhafte Stellen, welche in blau zu erkennen sind. Dies sind Profile, welche M3C2-Distanzen von < -5 mm erreichen. Des Weiteren ist an diesen Stellen eine deutlich ungleichmäßigere Verteilung, d. h. größere Abstände zwischen den Profilen am Mockup zu erkennen. Dies spricht für eine schnelle ruckartige Bewegung, welche vor allem auf eine höhere Winkelgeschwindigkeit \dot{r}_Z zurückzuführen ist. Die berechneten M3C2-Distanzen haben einen Mittelwert von -0,2 mm und eine Standardabweichung von 1,6 mm. Wird eine lineare Interpolation durchgeführt, so reduziert sich die Standardabweichung der M3C2-Distanzen auf 0,6 mm. Der Mittelwert beträgt 0,2 mm. Des Weiteren ist festzustellen, dass es weniger Bereiche mit signifikanten linienhaften Abweichungen am Objekt gibt, siehe Abbildung 5.9. Aufgrund der größeren Distanzen hat die Skala der Abbildung 5.9 einen unterschiedlichen Wertebereich zu den Folgeabbildungen.

An einigen Stellen, verbleiben jedoch immer noch linienhafte Abweichungen (rote Streifen). Die M3C2-Distanzen betragen hier 3-4 mm und weisen im Vergleich zu denen der Prozessierung ohne Bewegungsmodell positive Beträge auf. Es ist jedoch zu beobachten, dass schon eine einfache lineare Interpolation zu einer signifikanteren Verringerung der maximalen M3C2-Distanzen führt. Dies zeigt sich auch in der geringeren Standardabweichung. Somit ist festzuhalten, dass dies zu einer verbesserten Genauigkeit bei der k-TLS Punktwolke führt. Dies trifft auch auf die mit dem iEKF prozessierten k-TLS Daten zu. Im Vergleich zur linearen Interpolation werden hier ähnliche Werte für die Standardabweichung und beim Mittelwert erreicht. Bei Betrachtung der Abbildung 5.10 fällt jedoch auf, dass linienhaften Abweichungen weiter verringert werden konnten.

Die verbleibenden Abweichungen sind vorrangig systematischen Ursprungs. Diese sind z.B. an den Rändern der Bullaugen und der Scheuerleiste zu verzeichnen. Als Grund hierfür wird der Kanteneffekt (Mixed-Pixel) und ein sehr geringer Auftreffwinkel (< 20 gon) vermutet.



Abbildung 5.9: Berechnete M3C2-Distanzen zwischen T-Scan und k-TLS-Rollwagen linear interpoliert, Werte in [mm].



Abbildung 5.10: Berechnete M3C2-Distanzen zwischen T-Scan und k-TLS-Rollwagen iEKF (Glättung), Werte in [mm].

Um die Qualität der gefilterten Lösung bewerten zu können, wird die Innovation der einzelnen Beobachtungen betrachtet. Zu Vergleichszwecken wird hierbei die iEKF-Prozessierung jeweils nur vorwärts und als Glättung (vorwärts/rückwärts) durchgeführt. Es ist festzustellen, dass sich die Innovationen aufgrund der Glättung verringern. Dies zeigen die Werte in der Tabelle 5.2. In dieser sind die maximalen bzw. minimalen Werte, die Standardabweichungen sowie die Differenzen zwischen der Innovationen der vorwärts und geglätteten iEKF Prozessierung zusammengestellt.

Tabelle 5.2: Darstellung der Innovationen der iEKF-Prozessierung, vorwärts sowie vor-
wärts/rückwärts (Glättung) - Rollwagen.

Parameter	vorwärts				σ. σ.		
1 arameter	max. mi		σ_{vw}	max.	min.	σ_{gl}	$v_{vw} - v_{gl}$
$t_X \text{ [mm]}$	2,70	-2,52	0,36	2,03	-1,41	0,24	0,12
$t_Y \; [mm]$	1,42	-2,78	0,26	1,64	-1,74	0,18	0,08
$t_Z \; [mm]$	1,71	-0,62	0,10	1,36	-0,71	0,08	0,02
r_X [rad]	0,00569	-0,01157	0,00067	0,00627	-0,00954	0,00059	0,00008
r_Y [rad]	0,00184	-0,00331	0,00032	0,00168	-0,00264	0,00027	0,00005
r_Z [rad]	0,00462	-0,00395	0,00102	0,00260	-0,00291	0,00084	0,00018

Der Rollwagen bewegt sich auf festen Untergrund. Daher ist vorrangig eine omnidirektionale Bewegung in der X- und Y-Richtung bzw. eine Drehung um die Z-Richtung zu erwarten. Es ist zu beobachten, dass für diese drei Komponenten höhere Werte in den Innovationen auftreten. Bei der nur vorwärts durchgeführten iEKF-Prozessierung werden als maximale bzw. minimale Werte bis zu 2,8 mm erreicht, vergleiche Tabelle 5.2. Bei t_Z liegen die Werte bei maximal 1,7 mm, dies zeigt sich auch in der geringeren Standardabweichung σ_{vw} , siehe Tabelle 5.2. Hierin ist auch zu erkennen, dass sich durch die Glättung sowohl die minimalen und maximalen Werte, als auch die Standardabweichung σ_{al} verringern. Im Falle der Rotationen weist die, welche um die Z-Achse (r_Z) erfolgt, die größte Standardabweichung auf. Sie liegt bei 0,00102 rad (vorwärts) und bei 0,00084 rad (Glättung). Eine detailliertere Darstellung der Innovationen als auch deren Verteilungen sind in den Abbildungen A.3 - A.6 im Anhang zu finden. Hier fällt auf, dass bei den Translationen die Werte zum Großteil zwischen ± 1 mm liegen. Im Falle der Rotationen liegen die Innovationen meistens unter 0,003 rad. Bei den Translationen t_X und t_Y als auch bei der Rotation r_Z ist eine größere Streuung zu beobachten. Dies könnte seine Ursache in der rauen Oberfläche der Betonplatten haben. Diese sorgt für ein verstärktes hochfrequentes vibrieren, welchees nicht durch das allgemein gehaltene Bewegungsmodell berücksichtigt wird.

Die im Rahmen der Validierung (M3C2-Distanzen) erwähnten kurzen schlagartigen Bewegungen, welche aus dem Überfahren der Dehnungsfugen zwischen den Betonplatten resultieren, zeigen sich zum einen in den Parametern des Zustandsvektors, siehe hierzu die Abbildungen A.1 und A.2 im Anhang. Des Weiteren werden diese Schläge in den Plots der Innovationen sichtbar, siehe Abbildungen A.3 und A.5 im Anhang. Kürzere stärkere Ausschläge zeigen sich in den Translationen t_X, t_Y und t_Z sowie bei der Rotation r_X . Hierdurch sind auch die deutliche höhere minimalen und maximalen Werte im Vergleich zu den Standardabweichung in der Tabelle 5.2 zu erklären. Besonders kritisch ist die Veränderung bei den Rotationen. Die maximale Verdrehung zwischen zwei Profilen wird bei der vorwärts iEKF-Prozessierung bei r_X mit -0,01157 rad erreicht, was 0,7 gon entspricht. Unter der Annahme einer Messdistanz von 5 m, beträgt die Verschiebung 55 mm am Objekt. In diesem Fall ist eine punktweise Georeferenzierung, welche die Bewegung mit betrachtet, zwingend erforderlich um die eingangs im Kapitel 1 erwähnte Genauigkeitsforderung zu erreichen. Anhand der Innovationen ist jedoch auch ersichtlich, dass im Falle der extremen Schläge die Prädiktion des Zustandes nicht ausreichend ist. Ob in diesem Fall eine Erweiterung des Systemmodells bei der Prädiktion zu einer Verbesserung führt, wäre genauer zu untersuchen. Eine höhere Datenrate bei der Georeferenzierungsmessung ist in diesen extremen Bewegungsphasen von Vorteil. Dies führt jedoch zu einigen Änderungen im Systemaufbau bzw. bei der Prozessierung (Synchronisierung). Eine weitere Möglichkeit stellt die Hinzunahme zusätzlicher Sensorik dar, denkbar wären hier IMU bzw. Kameras. Festzuhalten bleibt jedoch, dass die iEKF-Prozessierung zusätzlich rückwärts durchgeführt werden sollte. Hierdurch können die maximalen Ausschläge verringert werden, vergleiche Tabelle 5.2.

Seilschlitten

Im Folgenden werden die Auswertungen der Messung mit dem Seilschlitten vorgestellt. Die Parameter der Messung sind in der Tabelle 5.1 zusammengestellt. In den Abbildungen A.7 und A.8 sind die Zustände für die iEKF prozessierten Daten vorwärts und mit Glättung dargestellt. Hierin ist zu erkennen, dass die Plattform während der Messung zunächst eine Standphase hat. Der Start der Bewegung erfolgt erst nach Epoche (Profil) 500. Durch die leicht schräge Aufhängung wird der Seilschlitten beschleunigt. Die maximale Geschwindigkeit beträgt 1 m/s. Nach dem der Seilschlitten sich in Bewegung setzt, dass heißt während der Epochen 500 - 700, ist keine gleichmäßige Beschleunigung zu erkennen, vergleiche Abbildungen A.7 und A.8. Theoretisch sollte an einem schräg gespannten Seil eine gleichmäßig Beschleunigung erfolgen. Es ist jedoch zu erkennen, dass diese durch eine Pendelbewegung überlagert wird, welche sich vorrangig in Y-Richtung auswirkt. Es wird vermutet, dass diese aus dem Loslassen des Seilschlittens resultiert, welcher zunächst festgehalten wurde. Aufgrund der einfachen Aufhängung am Seilschlitten überträgt sich die Pendelbewegung direkt auf die k-TLS-Messung. Dies ist auch in den berechneten M3C2-Distanzen zu den Referenzdaten (T-Scan) zu erkennen. Wird für die Prozessierung kein Bewegungsmodell verwendet, so ergeben sich größere Abweichungen, siehe Abbildung 5.11. Aufgrund der größeren M3C2-Distanzen wird für die Abbildung 5.11 eine im Vergleich zu den beiden folgenden Abbildungen unterschiedliche Farbskala verwendet.



Abbildung 5.11: Berechnete M3C2-Distanzen zwischen T-Scan und k-TLS-Seilschlitten ohne Bewegungsmodell, Werte in [mm].

Diese betragen im Mittel 3,4 mm und haben ein Standardabweichung von 2,2 mm. Abweichungen im Bereich von 1 - 2 mm sind nur im rechten Bereich (Startphase der Messung) des Mockups zu erkennen. Im vorliegenden Fall findet eine stärker beschleunigte Bewegung statt, welche zusätzlich von einer seitlichen Pendelbewegung überlagert wird. Hieraus ergeben sich zum Teil M3C2-Distanzen welche deutlich über > 3 mm liegen. Hieraus ist abzuleiten, dass zwingend ein Bewegungsmodell

zu verwenden ist. Schon durch eine einfache lineare Interpolation, werden die M3C2-Distanzen deutlich reduziert, vergleiche Abbildung 5.12.



Abbildung 5.12: Berechnete M3C2-Distanzen zwischen T-Scan und k-TLS-Seilschlitten linear interpoliert, Werte in [mm].

Im Mittel betragen die Abweichungen nur noch 0,3 mm und haben eine Standardabweichung von 0,8 mm. Größere Abweichungen, welche eine Größenordnung von 2 - 5 mm erreichen, treten nur noch im Falle von einigen Profilen auf. Dies zeigt sich in den blau bzw. orange bis rot eingefärbten streifenhaften Bereichen, vergleiche Abbildung 5.12. Eine weitere Verbesserung wird durch die iEKF-Prozessierung (Glättung) erreicht, siehe Abbildung 5.13.



Abbildung 5.13: Berechnete M3C2-Distanzen zwischen T-Scan und k-TLS-Seilschlitten iEKF (Glättung), Werte in [mm].

In diesem Fall ergibt sich ein Mittelwert von 0,2 mm und eine Standardabweichung von 0,6 mm. Auch die streifenhaften Abweichungen können hierdurch verringert werden. Die verbleibenden Abweichungen mit einer Größenordnung von > 2 mm sind vorrangig systematischen Ursprungs. Dies

zeigen die blauen und roten Verfärbungen an den Rändern der Bullaugen und an der Scheuerleiste, vergleiche Abbildung 5.13. Auf diese Thematik wird im Rahmen des Abschnittes 6.5.2 detaillierter eingegangen. Zusammenfassend ist jedoch festzuhalten, dass mit Hilfe der iEKF Prozessierung (Glättung) für den größten Teil die geforderten Genauigkeiten bei der k-TLS-basierten Objekterfassung erreicht werden.

Bei Betrachtung der Qualität der iEKF-Prozessierung wird auch im Falle der Scheilschlittenmessung in vorwärts vw und Glättung (gl) unterschieden. Auch hier gilt es zu beachten, dass die Messung erst nach einer Standphase (bis ca.Epoche 500) gestartet wurde. Anhand der Innovationen ist erkennbar, dass bei der Translation t_Y und bei der Rotation r_Z die größten Werte auftreten. Dies zeigt sich zum einen in den Abbildungen A.9 und A.12, sowie anhand der Tabelle 5.3.

Beobachtung		vorwärts					
	max.	min.	σ_{vw}	max.	min.	σ_{gl}	$v_{vw} v_{gl}$
$t_X \text{ [mm]}$	0,57	-0,57	0,13	0,39	-0,45	0,09	0,04
$t_Y [\mathrm{mm}]$	0,91	-1,21	0,21	0,69	-0,73	$0,\!15$	0,06
$t_Z [\rm{mm}]$	0,90	-0,75	0,20	0,43	-0,39	0,10	0,10
r_X [rad]	0,003162	-0,00386	0,00082	0,00202	-0,00213	0,00046	0,00036
r_Y [rad]	0,001626	-0,00209	0,00042	0,00149	-0,00148	0,00034	0,00008
r_Z [rad]	0,007642	-0,00660	0,00147	0,00556	-0,00529	0,00114	0,00033

Tabelle 5.3: Darstellung der Innovationen der iEKF-Prozessierung, vorwärts sowie vor-
wärts/rückwärts (Glättung) - Seilschlitten.

Bei der vorwärts durchgeführten iEKF-Prozessierung wird bei der Translation t_Y ein maximaler Wert von -1,21 mm erreicht. Im Falle von r_Z beträgt der maximale Wert 0,007642 rad. Dies entspricht bei einer Messentfernung von 5 m einer Verschiebung von 38 mm. Auch hier ist durch die Glättung eine Verringerung der Werte zu beobachten, vergleiche Tabelle 5.3. Im Vergleich zum Rollwagen kommt es beim Seilschlitten zu einer gleichmäßigeren Bewegung. Vorteilhaft ist hierbei, dass keine Verbindung mit dem Boden besteht. Hierdurch werden die hieraus resultierenden Störeinflüsse verringert. Durch die einfach gehaltenen Aufhängung kommt es jedoch zu einer Pendelbewegung. Dies zeigt sich in den dargestellten Zuständen der Parameter der iEKF-Prozessierung, siehe Abbildung A.7 (vorwärts) und A.8 (Glättung). Hierin ist zu erkennen, dass diese Pendelbewegung vorrangig um die Z-Achse erfolgt. Dies zeigt sich vor allem im Bereich der Epochen 500 - 700 bei den Parametern r_Z, \dot{r}_Z und \ddot{r}_Z . Des Weiteren sind höhere Werte bei den Parametern \dot{t}_Y und \dot{t}_Z sowie \ddot{t}_Y und \ddot{t}_Z festzustellen.

5.5 Zusammenfassung und Resümee

In diesem Kapitel wurde die Georeferenzierung eines k-TLS-basierten MSS vorgestellt. Hierbei hat es sich als essentiell erwiesen die Georeferenzierung punktweise durchzuführen. Bereits durch eine einfache lineare Interpolation konnten die Ergebnisse deutlich verbessert werden. Dies zeigt sich im Vergleich zwischen den k-TLS Punktwolken und den Referenzdaten, vergleiche Abschnitt 5.4. Eine weitere Verbesserung wird durch die Prozessierung basierend auf einem iEKF erreicht. Hierin werden pro Epoche die Zustände bestimmt. In dem Zustandsvektor werden neben den erfassten Translationen und Rotationen jeweils dazugehörigen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, führt dazu, dass die Geschwindigkeiten als nicht konstant angenommen werden. Über die zeitlichen Unterschiede $\Delta \tau$ zwischen den einzelnen Profilpunkten wird die Trajektorie interpoliert. Basierend hierauf erfolgt die Georeferenzierung für alle Profilpunkte, welche sich besser auf die vorliegenden Ver-

hältnisse bezieht. Darüber hinaus hat sich die Glättung, dass bedeutet die Filterung vorwärts und rückwärts durchzuführen, als positiv erwiesen. Hierdurch konnten die berechneten Innovationen im Vergleich zu einer rein Vorwärts durchgeführten iEKF-Prozessierung verringert werden, vergleiche Tabelle 5.2 und 5.3.

Die verwendeten mobilen Plattformen haben einen einfachen Aufbau. Hierdurch werden Störeffekte auf die Plattform und somit auf die Georeferenzierung übertragen. Als nachteilig haben sich die fehlende Dämpfung beim Rollwagen und die einfache Aufhängung des Seilschlittens ausgewirkt, vergleiche hierfür die Abbildung 5.7. Beide verwendeten Plattformen unterscheiden sich grundlegend in der Art der Bewegung. Der Rollwagen besitzt beweglichen Räder, daher kann die Bewegung in der Horizontalen sehr flexibel erfolgen. Beim Seilschlitten wird die Bewegungsrichtung fest definiert. Der Vorteil hierbei besteht darin, dass die Messung unabhängig vom Boden stattfinden kann. Hierdurch werden Störungen verhindert, welche aus der Bodenbeschaffenheit resultieren. Ein Beispiel hierfür sind Hindernisse (z. B. Betonfugen), welche zu Stößen führen, vergleiche Abschnitt 5.4.2. Auch beim Seilschlitten treten nachteilige Bewegungsformen auf. Beispielhaft sind hier das Schlingern bzw. das Pendeln des verwendeten Seilschlittens zu nennen.

Um mögliche Störbewegungen zu kompensieren bzw. zu verhindern sollte ein geeignetes Plattformdesign verwendet werden. Ein Beispiel ist in der Abbildung 5.5 dargestellt. Durch Verwendung von Dämpfungselementen und mit Hilfe eines geeigneten linearen Antriebs, wird die Bewegungsform deutlich vereinfacht. Dies führt dazu, dass auch ein weniger komplexes Bewegungsmodell verwendet werden kann. Eine weitere Möglichkeit die Georeferenzierung zu verbessern bzw. diese robuster zu gestalten stellt die Nutzung von zusätzlicher Sensorik dar. Dies können z. B. IMU oder Kameras sein. Das implementierte Filtermodell bietet hierfür die Möglichkeit. In Trusheim (2018) erfolgt ein erster Test hierzu, welcher auf simulierten Beobachtungsdaten basiert. Des Weiteren ist eine Erweiterung des Bewegungsmodells denkbar. Hierin könnten Pendelbewegungen durch geeignete Bewegungsgleichungen mit berücksichtigt werden.

Es ist jedoch zu resümieren, dass sich die hier beschriebene Vorgehensweise bewährt hat. Dies zeigt sich anhand der berechneten M3C2-Distanzen zwischen den k-TLS-Daten und dem Referenzdatensatz. Diese sind in den Abbildungen 5.8 - 5.10 (Rollwagen) und in den Abbildungen 5.11 - 5.13 (Seilschlitten) zusammengefasst. Die Vorgabe eine k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung mit einer Genauigkeit von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm durchzuführen, konnte für die überwiegend Mehrheit der Daten erreicht werden. Eine detailliere Betrachtung zum Thema Qualitätssicherung der erfassten k-TLS Punktwolken erfolgt im nächsten Kapitel.

6 Validierung und Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung spielt in der industriellen Fertigung eine wichtige Rolle. Die Qualitätsanforderungen an Produkt, Prozess oder System hängen von den Anwendungen ab, daher sind daraus abgeleitete Qualitätsmerkmale anwendungsorientiert. Das heißt, die Definition für Qualität muss für den jeweiligen Anwendungsfall konkretisiert werden. Dabei kann ein sogenanntes Qualitätsmodell, vergleiche Abbildung 6.1 verwendet werden, dass aus mehreren Qualitätsmerkmalen besteht.



Qualitätssicherungskonzept

Abbildung 6.1: Darstellung eines Qualitätssicherungskonzeptes, Abbildung aus Schwieger und Zhang (2019) nach Schweitzer und Schwieger (2011).

Jedes Qualitätsmerkmal wird wiederum durch einen oder mehrere Qualitätsparameter weiter konkretisiert bzw. beschrieben. Die Qualität wird mittels der Parameterwerte messbar bzw. beurteilt. Wenn der jeweils gemessene Wert zum Beispiel innerhalb eines Toleranzbereichs liegt, ist die Qualität für diese Parameter erreicht (Schwieger und Zhang, 2019).

Wie bereits in Abschnitt 2.5.3 erwähnt, sind die Genauigkeit und die Vollständigkeit zwei der wesentlichsten Qualitätsmerkmale bei der 3D-Objekterfassung mit TLS. Dies gilt insbesondere bei der Fertigung von industriellen Großstrukturen, vergleiche Abschnitt 2.1. Auch die Spezifikation der Genauigkeit (Qualitätsmerkmal) erfolgt durch einen oder mehrere Parameter. In Falle von geodätischen Messprozessen werden hierfür oft die Präzision, die Standardabweichung, sowie die Auflösung und Sensitivität verwendet. Die jeweilige Definition dieser Größen erfolgt in Normen, wie z. B. der DIN 1319-2:2005, siehe DIN 1319-2:2005-10 (2005). Auf die explizite Wiedergabe sowie eine Diskussion wird hier nicht eingegangen, hierfür sei auf Hennes (2007) verwiesen.

Es ist jedoch anzumerken, dass die qualitative Beschreibung sehr aufwendig sein kann. Hier müssen auch ökonomische Gesichtspunkte mit zu beachtet werden. Ein Beispiel sind falsche Annahmen, welche zu negativen Auswirkungen führen. Als weiterer Punkt ist zu nennen, dass für die Bestimmung der Parameter zum Teil aufwendige Messkonzepte und teure Sensoren benötigt werden. Aufgrund der Tatsache, dass in vielen Fällen nur unzureichende Informationen über die Richtigkeit der Messdaten vorliegen bzw. diese nur sehr aufwendig bestimmt werden können, ist es praktikabler auf eine quantitative Betrachtung überzugehen. Eine quantitative Angabe stellt die Messunsicherheit dar. Für die Bestimmung von Unsicherheiten in Messungen hat sich der Leitfaden GUM, als ein internationaler Standard etabliert, siehe JCGM (2008b). Eine detailliertere Darstellung zum Thema Unsicherheiten ist im Abschnitt 2.2 zu finden.

Da es sich beim TLS um ein aus mehreren Prozessen bestehendes Messverfahren handelt, ist ei-

ne Betrachtung als Gesamtunsicherheit unabdingbar. Eine Darstellung der einzelnen Schritte und der damit verbundenen Unsicherheitsquellen erfolgt in der Abbildung 2.9. Der Prozess der 3D-Objekterfassung wird im Falle von k-TLS um zusätzliche Messgrößen bzw. Prozessierungsschritte erweitert. Hierzu zählen im wesentlichen die Synchronisierung, die Georeferenzierung und die Systemkalibrierung, vergleiche Abbildung 6.2. An dieser Stelle sei angemerkt, dass hierfür kein Anspruch auf Vollständigkeit besteht. Für eine detaillierte Darstellung des Erfassungsprozesses mit k-TLS sei auf den Abschnitt 2.6 verwiesen.



Abbildung 6.2: Überblick über die wesentlichen Unsicherheiten beim TLS, die spezifischen Unsicherheiten des k-TLS sind in rot dargestellt (Hartmann und Hartmann, 2022).

Im Fokus dieses Kapitels steht die Bestimmung der Gesamtunsicherheit einer k-TLS-basierten Objekterfassung. Hierfür sind die einzelnen Unsicherheiten der benannten Teilschritte entsprechend abzuleiten, zu spezifizieren und abschließend zusammen zu fassen.

Das Kapitel gliedert sich dabei wie folgt. Zunächst wird ein Überblick über die Strategien und Ansätze bei der Modellierung von Unsicherheiten gegeben. Im Anschluss wird auf die Modellierung der Gesamtunsicherheit beim k-TLS eingegangen. Dies geschieht am konkreten Beispiel des im Abschnitt 2.7 beschriebenen k-TLS-basierten MSS. Die Bestimmung der Gesamtunsicherheit erfolgt durch eine Vorwärtsmodellierung. Die Validierung der Ergebnisse erfolgt im Rahmen einer Rückwärtsmodellierung. Hierbei werden die Ergebnisse einer prozessierten k-TLS-basierten 3D-Punktwolke mit einem hochgenauen Referenzdatensatz verglichen. Dieser wurde mit Hilfe eines Lasertrackers, hier ein Leica AT901 in Verbindung mit einer T-Scan erfasst. Der Vergleich wird auf Basis eines M3C2-Distanzvergleiches durchgeführt. Abschließend werden diese mit den ermittelten Gesamtunsicherheiten verglichen. Hierdurch erfolgt eine Bewertung der prozessierten Messdaten bzw. der ermittelten Gesamtunsicherheiten.

6.1 Strategien und Ansätze

Die Bestimmung von Unsicherheiten stellt auf dem Gebiet der Messtechnik ein sehr zentrales Thema dar. In vielen Fällen werden diese in Verbindung mit den untersuchten Sensoren bzw. MSS mit angegeben. Ein Messergebnis wird erst dann als vollständig angesehen, wenn es mit einer quantitativen Angabe zur Genauigkeit bzw. Unsicherheit versehen ist. Für die geodätische Praxis von besonderem Interesse sind Unsicherheitsmaße, die sich im statistischen Sinne konsistent interpretieren lassen, unabhängig davon, ob sie sich auf ursprüngliche oder abgeleitete Größen, wie z.B. Punktkoordinaten beziehen (Kutterer und Schön, 2004)

Beim TLS werden mehrere Messgrößen erfasst, hierzu gehören die Distanz (D), die horizontale Richtung (hz) und der Vertikalwinkel (v). Das genaue Messprinzip ist im Abschnitt 2.4 beschrieben. Eine wichtige Voraussetzung für die Verwendung eines Laserscanners ist eine Sensorkalibrierung. Diese ist notwendig, um systematische Abweichungen in der erfassten Punktwolke zu reduzieren. Außerdem liefert diese wichtige Informationen für die Aufstellung des stochastischen Modells der Beobachtungen (Holst u. a., 2016). Eine Darstellung zum Thema Sensorkalibrierung wird im Abschnitt 2.4.2 gegeben. Des Weiteren gab es in den letzten Jahren verschiedene Untersuchungen, um die Unsicherheiten der einzelnen Messgrößen zu bestimmen und entsprechend zu spezifizieren. Exemplarisch seien an dieser Stelle die Arbeiten von Neitzel (2006), Gordon (2008), Zámečníková u. a. (2014), Soudarissanane (2016) und Wujanz u. a. (2017) genannt.

Da es sich beim TLS um ein 3D-Messverfahren handelt, sind für eine Gesamtbetrachtung die Unsicherheiten der einzelnen Messgrößen zusammenzufassen. Auch auf diesem Gebiet gab es in den letzten Jahren diverse Arbeiten. Exemplarisch sei hierfür auf Glennie (2007), Paffenholz und Bae (2012), Timmen (2016), Ozendi u. a. (2017), Lipkowski und Mettenleiter (2019), Stenz u. a. (2020) und Hartmann und Hartmann (2022) verwiesen. Bei der Mehrzahl der Arbeiten wird berücksichtigt, dass eine 3D-Objekterfassung nicht nur aus einer einzelnen Aufnahme (Standpunkt) besteht. Daher werden die Unsicherheiten aus der Georeferenzierung mit berücksichtigt. Eine klassische Vorgehensweise hier stellt die VF dar, vergleiche Abschnitt 3.2.3.1. Hierbei gilt es zu beachten, dass die vorliegenden Unsicherheiten Varianzen darstellen. Sie entsprechen damit der Normalverteilung, vergleiche Abschnitt 3.2.1. Liegen Informationen über die Kovarianzen vor, so können diese mit in die Betrachtung einbezogen werden. Dies geschieht mit Hilfe der VKM, vergleiche Gleichung 3.20. Die Aufstellung einer realistischen und vollbesetzten VKM beim TLS stellt eine komplexe Aufgabenstellung dar. Hierfür ist ein umfangreiches Unsicherheitsbudget, welche möglichst viele der Einflüsse berücksichtigt, aufzustellen. Diese können dabei grob in objektbezogene, instrumentelle und atmosphärische Einflüsse klassifiziert werden. Die Abbildung 2.9 zeigt eine detailliertere Zusammenstellung im Rahmen eines Ishikawa-Diagramms. Für die Aufstellung der VKM gibt es mehrere Strategien. In Harmening u. a. (2016) und Kauker und Schwieger (2017) wird die Aufstellung einer synthetischen VKM thematisiert. Diese beinhaltet mehrere Beobachtungsblöcke, welche die Korrelationen der einzelnen Größen beinhaltet. Eine Spezifikation der Unsicherheiten nach dem GUM wird in Zhao u. a. (2017) aufgegriffen. In Schmitz u. a. (2021) wird eine räumliche Betrachtung bei der Ermittelung der Korrelationen beim TLS vorgestellt. Kermarrec u.a. (2021) stellen eine zeitliche Betrachtung zur Ermittelung der Korrelationen und Aufstellung der VKM vor. In der Vielfalt der Ansätze zeigt sich die besondere Relevanz dieses Themas.

Eine besondere Form der VF stellt Vennegeerts (2011) vor. Hier wird eine inkrementelle Vorgehensweise beschrieben, wodurch eine besonders effiziente Form bei der Übertragung der Unsicherheiten auf Massendaten erreicht wird. Darüber hinaus wird hier der Umstand thematisiert, dass in einigen Fällen nicht die Unsicherheiten der integrierten Sensoren, sondern intern prozessierter Lösungen zur Verfügung stehen. Ein Beispiel hierfür stellen kinematische Filter dar.

Bei der praktischen Umsetzung der Unsicherheitsmodellierung kann es vorkommen, dass die Unsicherheiten nicht der Normalverteilung entsprechen. Somit führt eine VF im klassischen Sinne nicht immer zu realistischen Ergebnissen und bildet schließlich die vorliegenden Unsicherheiten nicht korrekt ab. In den GUM wird daher in unterschiedliche Arten von Unsicherheiten (Typ A und B) unterschieden. Für diese können auch unterschiedliche Verteilung vorliegen, vergleiche hierzu Abschnitt 3.2.2 bzw. JCGM (2008b). Für die Fortpflanzung der Unsicherheiten bietet der GUM die Möglichkeit der kombinierten Unsicherheit, siehe Gleichung 3.26 bzw. 3.27. In Kutterer und Schön (2004) wird jedoch darauf hingewiesen, dass die im GUM beschriebene Vorgehensweise nicht immer korrekt ist. Im Speziellen betrifft dies die Vorgehensweise bei der Kombination von Unsicherheiten, welche eine unterschiedliche stochastische Verteilungen haben. Die Autoren erläutern dies anhand eines Beispiels mit zufälliger (Normalverteilung) und systematischer Komponente (Gleichverteilung). Die Auswirkung betrifft dabei nicht die berechnete Varianz, sondern den Vertrauensbereichs. Dies spiegelt sich in der nicht-gaußschen WDF der Ausgangsgrößen wieder (Alkhatib u. a., 2009). Daher wird in Koch (2008) beschrieben, wie sich Unsicherheiten mittels MCS integriert verarbeiten lassen. Alkhatib u. a. (2009) erläutern Möglichkeiten zur Kombination von Unsicherheiten mit unterschiedlichen Verteilungstypen. Neumann (2009) diskutiert die Wechselwirkung zwischen den Beobachtungen und dem funktionalen Modell. Es wird motiviert die systematischen Abweichungen durch impräzise Größen im Rahmen der Modellierung mit zu betrachten.

Des Weiteren kann es in der Praxis dazu kommen, dass weder die Modelle linear sind, noch entsprechend in Form einer Taylorreihe exakt abgebildet werden. Hieraus resultiert, dass keine exakte Fortpflanzung der Unsicherheiten erfolgt (Hennes, 2007). Auch in diesem Fall ist zu resümieren, dass im Falle eines stark nichtlinearen oder sehr kompliziert zu linearisierenden funktionalen Zusammenhangs, die nach GUM vorgeschlagene Vorgehensweise nicht ausreichend ist. Dies liegt daran, dass nur ein Beobachtungsmodell verwendet wird, welches über die besten verfügbaren Schätzungen der Eingangsgrößen linearisiert wird.

Beide vorab beschriebene Punkte bekräftigen die Forderung, die Vorgaben des GUM entsprechend zu erweitern. Dies wird beispielsweise in Siebert und Sommer (2004) dargelegt und die Verwendung von Monte-Carlo-Techniken empfohlen. Im Anhang "Suplement 1" des GUM, welcher die Fortpflanzung von Unsicherheiten unter Verwendung eines probabilistischen Ansatzes darstellt, ist dies schließlich umgesetzt, vergleiche JCGM (2008a).

Bestimmung und Validierung von Qualitätsparametern

In diesem Abschnitt wird kurz auf die Bestimmung und Validierung der beschreibenden Qualitätsparameter eingegangen. Prinzipiell ist eine Verbindung zwischen den relevanten Eingangsgrößen auf der einen Seite und den Zielgrößen auf der anderen Seite herzustellen. Beide Seiten lassen sich numerischen (quantitativ) von einander ableiten. Hierbei wird in *Vorwärts-* und *Rückwärtsmodellierung* unterschieden.

Bei der *Vorwärtsmodellierung* stehen die Qualitätsparameter der Eingangsgrößen a-priori zur Verfügung, welche auf die relevanten Zielgrößen fortgepflanzt werden. Bei der *Rückwärtsmodellierung* erfolgt dies entgegengerichtet. Eine gängige Vorgehensweise hierbei ist die Verwendung von Referenzdaten mit einer übergeordneten Genauigkeit. Durch Bildung der Differenzen zwischen den Referenz- und Messdaten erfolgt die Ableitung der entsprechenden Qualitätsparameter. Hierbei ist zu beachten, dass die Rückwärtsmodellierung meist auf abgeleiteten Werten (Zielgrößen) zu erfolgen hat. Die Ergebnisse aus einer Rückwärtsmodellierung lassen sich für die Verbesserung der Vorwärtsmodellierung nutzen (Paffenholz, 2015). Je nach Problemstellung bzw. Detailgrad variiert die Anzahl der Größen und somit auch die Komplexität der Modellierung. Die Abbildung 6.2 gibt eine Überblick (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) über den Zusammenhang beim k-TLS.

Ein Beispiel für eine Vorwärtsmodellierung basierend auf einer MCS stellen Alkhatib und Kutterer (2013) vor. Hier werden die Unsicherheiten einer TLS-Profilmessung modelliert. Die Unsicherheiten der Eingangsgrößen werden dabei mit unterschiedliche Verteilungen, wie Normal- und Rechteckverteilung spezifiziert. Die Berechnung wird eine Anzahl von 100.000 Stichproben verwendet. Die modellierten statistischen Momente zweiter bis vierter Ordnung, werden mit denen aus einer realen TLS-Profilmessung verglichen und bestätigen diese. Weitere Beispiele für die Rückwärtsmodellierung, sind in Stenz u. a. (2017) und Stenz u. a. (2020) zu finden. Hier werden die erfassten TLS-Daten mit Referenzdaten verglichen. Dies erfolgt auf Basis des M3C2-Algorithmus nach Lague u. a. (2013). Die berechneten M3C2-Distanzen werden anhand ihrer Verteilung analysiert und hinsichtlich möglicher Unsicherheiten der Eingangsparameter untersucht. Darüber hinaus werden geometrische Kenngrößen (z. B. Radius) einiger Referenzgeometrien (z. B. Ebene, Zylinder und Paraboloid) berechnet mit einander verglichen. Eine ähnliche Vorgehensweise erfolgt in Hartmann und Hartmann (2022). Hierin wird jedoch zusätzlich eine Vermaschung der Referenzdaten durchgeführt. Basierend auf dieser erfolgt der Vergleich mit den TLS-Daten. In NavVis (2021) erfolgt die Berechnung von Abweichungen (Cloud
2 Cloud) zwischen k-TLS und s-TLS Daten, wobei letzteren die Referenz darstellt. Eine Analyse der Abweichungen erfolgt nicht. Die aus dem Vergleich resultierenden Grenzen (1 σ bzw. 2 σ) werden verwendet, um die Genauigkeit des k-TLS-basierten MSS zu spezifizieren.

6.2 Genauigkeitsuntersuchungen der Lasertrackermessung zur T-Probe

In diesem Abschnitt wird ein Ansatz, durch welchen die Genauigkeiten der 6 DoF-Messung zwischen einem Lasertracker (speziell ein Leica AT960) und einer T-Probe untersucht werden, vorgestellt. Dies erfolgt vor dem Hintergrund, dass der Hersteller die meisten der Messgrößen lediglich als MPE spezifiziert. Weiterführend erfolgt die Angabe, dass typische Messwerte etwa der Hälfte der MPE-Werte entsprechen, vergleiche hierfür die Tabelle 2.7 bzw. Hexagon (2022a). Dies wird im Falle der meisten praktischen Anwendungen ausreichen, eine detaillierte Betrachtung ist hierdurch jedoch nur schwer möglich. Des Weiteren ist festzustellen, dass für die 6 DoF-Messung zwischen Lasertracker und T-Probe keine detaillierteren Untersuchungen vorliegen.

Für die T-Probe im Speziellen wird nicht zwischen den (drei) Translationen und Rotationen als unterschiedliche Messgrößen unterschieden, siehe Gleichung 5.1. Daher scheint auch hier eine Überprüfung bzw. Bestimmung der Genauigkeitsangaben von Relevanz. Eine besondere Herausforderung stellt die geringe Größenordnung der Genauigkeiten bei der Lasertrackermessung dar. Für die Translationen werden maximal 100 µm und für die Rotationen wenige mgon erwartet. Das bedeutet, dass speziell Aussagen zur Richtigkeit schwer zu treffen sind. Die klassische Vorgehensweise, einen Sensor mit einer um den Faktor zehn höheren Genauigkeit zur verwenden, ist hier nur schwer möglich. Daher wird hier mit Vergleichswerten, welche im Sinne einer Referenz zu interpretieren sind, gearbeitet. Auch hierfür wird der Leica AT960 verwendet. Streng genommen, ergibt sich bei Verwendung des gleichen Sensors keine Aussage zur Richtigkeit. Dies wird jedoch im Rahmen des Messkonzeptes versucht zu kompensieren.

Es ist anzumerken, dass einige der hier dargestellten Teilschritte und Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Masterarbeit Ehrhorn (2019) erfolgten. Dies betrifft die Aufstellung des Messkonzeptes, die praktischen Messungen als auch einige der durchgeführten Voruntersuchungen.

6.2.1 Messstrategie und Auswertung

Der grundlegende Ansatz für die Unsicherheitsüberprüfung der Georeferenzierung zwischen Lasertracker und T-Probe ist, dass die T-Probe auf einem Stativ fest montiert ist und diese mit Hilfe des Lasertrackers von mehreren Standpunkten angemessen wird. In diesem Fall wird der Leica AT960 LR, also die (Long Range) Variante verwendet. Das bedeutet die maximal mögliche Messdistanz beträgt 20 m. Die Aufstellung des Lasertrackers wird dabei so variiert, dass die Messungen mit unterschiedlichen Entfernungen und Orientierungen erfolgen. Einen Überblick ist in der Tabelle 6.1 zu finden. Die Lasertrackerstandpunkte befinden sich dabei auf mehreren Bogenstücken, welche in

Entfernung [m]	keine Verdrehung \rightarrow maximale Verdrehung					
5	51	52	-	54	-	
10	101	102	103	104	-	
15	151	152	153	154	155	
20	201	202	203	204	205	

Tabelle 6.1: Übersicht der Punktnummern der Standpunkte in Tabellenform.

den Entfernungen 5, 10, 15 und 20 m
 angeordnet sind. Die optimale Ausrichtung der T-Probe, dass entspricht einem Winkel von 90° zum Zielstrahl des Las
ertrackers, wird auf den Standpunkten 51, 101, 151 und 201 erreicht. Die Kreisbögen haben einen Öffnungswinkel von ca. 45°. Dies entspricht



der maximal möglichen Verkippung um die vertikale Achse der T-Probe, siehe Abschnitt 2.7.3. Der Messaufbau ist in der Abbildung 6.3 dargestellt.

Abbildung 6.3: Aufstellungen bei der Genauigkeitsüberprüfung zwischen Lasertracker und T-Probe.

Die Lasertrackermessungen zur T-Probe werden mit einer Frequenz von 50 Hz durchgeführt. Dies entspricht der Rotationsgeschwindigkeit des Laserscanners bei der späteren Objekterfassung. Da hierüber die Lasertrackermessung getriggert wird (Synchronisierung), vergleiche hierfür Abschnitt 2.7.2, entspricht dies auch der Messfrequenz bei der Georeferenzierung der mobilen Plattform.

Aus den Messdaten sollen zum einen die Präzision der 6 DoF abgeleitet werden. Hierfür werden auf jeden der Lasertrackerstandpunkte 250 Wiederholungsmessungen durchgeführt, was einer Messzeit von 5 Sekunden entspricht. Des Weiteren erfolgt die Überprüfung der Richtigkeit. Hierfür werden Messungen zu fünf im Umfeld des Messgebietes verteilten Referenzpunkten durchgeführt. Diese sind im Umfeld an den Wänden durch magnetische Nester vermarkt, siehe blaue Kreise in der Abbildung 6.3. Die Messungen erfolgen hierbei zu CCRs vom Typ Red-Ring-Reflektor, welche die höchsten Qualitätsansprüchen erreichen (Hexagon, 2022a). Mit Hilfe der Messungen zu den Referenzpunkten ist eine Verknüpfung zwischen den unterschiedlichen Standpunkten möglich. Die Messung vom Standpunkt 51, vergleiche linke Seite der Abbildung 6.3, wird hier als eine Basislinie definiert. Gründe hierfür sind, dass in diesem Fall die vermeintlich bestmöglichen Messbedingungen herrschen. Entscheidend hierfür sind eine senkrechte Ausrichtung zum Zielstrahl sowie eine kurze Messdistanz zwischen Lasertracker und T-Probe.

In einem ersten Schritt, erfolgt die Überprüfung der 6 DoF-Wiederholungsmessungen auf die Normalverteilung. Dies erfolgt zum einen auf Basis von Histogrammen, welche eine grafische Beurteilung ermöglichen. Darüber hinaus wird ein Chi-Quadrat-Test, um eine statistisch valide Aussage treffen zu können, durchgeführt. Für Details sei auf Witte und Sparla (2015, S. 644) bzw. auf Pearson (1900) verwiesen. Die Umsetzung erfolgt mit der MATLAB Funktion chi2gof. Im Anschluss wird ein Vergleich der Präzision mit den vom Hersteller angegebenen theoretischen Werten durchgeführt. Die Werte des Herstellers sind in der Tabelle 2.7 zusammengefasst. Die Präzision der Daten, in Form einer empirischen Varianz, wird nach Gleichung (3.10) berechnet. Als statistischer Test wird dabei der Test einer empirischen und theoretischen Varianz durchgeführt. Für die Details sei auf Heunecke u. a. (2013, S. 161) verwiesen.

Als weiteres folgt eine Überprüfung der Messgrößen auf ihre Richtigkeit. Hierfür wird die Messung zwischen Lasertracker und T-Probe auf dem Standpunkt 51 als Basis verwendet. Diese ist als eine Art relative Referenz zu verstehen. Die gemessenen Translationen werden als kartesische Koordinaten betrachtet (Einzelpunkt). Die Messungen der weiteren Lasertrackerstandpunkte werden durch eine Helmert-Transformation, vergleiche Abschnitt 3.1, in den Standpunkt 51 überführt. In diesem befindet sich der Ursprung des Referenzrahmens. Die Verknüpfung erfolgt über fünf gemessene Referenzpunkte. Diese sind fest mit den Wänden verbunden, gleichmäßig verteilt und umschließen das Messgebiet. Die Differenzen zwischen den transformierten Punkten (Messungen zur T-Probe) und des Standpunkt 51 wird mit Hilfe eines statistischen Tests auf Signifikanz geprüft. Diese Vorgehensweise wird auch bei der Analyse von Deformationsmessungen eingesetzt. Für weitere Details wird auf Heunecke u. a. (2013, S. 252) verwiesen. Für die Durchführung des Tests sind die Unsicherheiten von Relevanz. Diese setzen sich aus der Messung und der Transformation zusammen, wobei letzteres nicht für die Referenz gilt. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Transformationsparameter möglichst genau zu bestimmen sind. Zum einen kann eine Systematik die Abweichung verfälschen und zum anderen wird eine hohe Unsicherheit in der Transformation dazu führen, dass Systematiken aus der Translationsmessung nicht aufgedeckt werden. Eine detailliertere Darstellung kann Ehrhorn (2019) entnommen werden. Eine Zusammenstellung der berechneten Standardabweichungen der Transformationsparameter ist in der Tabelle A.8 gegeben.

6.2.2 Ergebnisse

In diesem Abschnitt, sind die Ergebnisse der Messungen zwischen Lasertracker und T-Probe dargestellt. Exemplarisch werden an dieser Stelle die Histogramme der gemessenen 6 DoF auf dem Standpunkt 51, in der Abbildung 6.4 dargestellt.



Abbildung 6.4: Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad].

Augenscheinlich ist zu erkennen, dass die Verteilungen nicht symmetrisch sind und nicht der Normalverteilung entsprechen. Dies spiegelt sich auch in dem durchgeführten Signifikanztest wider, welcher die Präzisionen auf Normalverteilung überprüft. Wie auch beim Standpunkt 51, ist in den wenigsten Fällen eine Normalverteilung festzustellen, vergleiche Tabelle A.9. Die Ergebnisse des durchgeführten Vergleichs, welcher auf Basis eines Chi-Quadrat-Tests die Präzisionen mit den theoretischen Standardabweichungen vergleicht, sind in der Tabelle 2.7 zusammengestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Ausnahme weniger Standpunkte (z. B. 52) die berechneten Präzisionen signifikant unterhalb der theoretischen Werte liegen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen A.10 - A.15 dargestellt. Im Falle von rot eingefärbten Werten ergibt der durchgeführte Test eine signifikante Abweichung. Die theoretischen Werte ergeben sich nach Addition der angegebenen Unsicherheiten der T-Probe $U_{X,Y,Z} = \pm 35$ µm und des Lasertrackers $U_{X,Y,Z} = \pm 15$ µm + 6 µm/m. Die angegebenen Werte sind als MPE spezifiziert. Typische Werte entsprechen jeweils der Hälfte der MPE, vergleiche hierzu Hexagon (2022a). Bei den Rotationen wird als typischer Wert die Angabe der T-Mac (gleiches Messprinzip) mit $U_{\omega,\varphi,\kappa} = \pm 0,01^{\circ}$ verwendet. Da auch im Falle der typischen Werte eine Rechteckverteilung angenommen wird, werden diese mit Hilfe der Gleichung 3.25 in eine Normalverteilung umgewandelt. Aus den berechneten Werten ist kein vollständiger systematischer Anstieg zu erkennen. Zwar steigen die Werte mit wachsender Distanz, dies trifft jedoch nur auf die Standpunkte, welche keine Verdrehung zwischen Lasertracker und T-Probe aufweisen, zu. Des Weiteren ist festzustellen, dass die Werte der Präzision mit steigender Verdrehung zwischen Lasertracker und T-Probe sinken. Es ist jedoch festzuhalten, dass für die meisten Standpunkte die Präzision bei den Rotationen unter 0,005° und bei den Translationen unter 0,05 mm liegt.

Die Ergebnisse der Überprüfung der Richtigkeit für die Translationen sind in der Tabelle A.16 und die der Rotationen in der Tabelle A.17 im Anhang dargestellt. Im Falle der Translationen ergibt sich, dass die Punktabweichungen, welche sich zwischen den transformierten Punkten und dem Standpunkt 51 (Basis) ergeben, ansteigen. Dies ist sowohl bei wachsender Distanz als auch mit stärkerer Verdrehung zwischen Lasertracker und T-Probe zu verzeichnen. Der größte Wert wird in 20 m und bei ca. 45° erreicht. Er beträgt 0.229 mm. Keine der Abweichungen ist jedoch signifikant, vergleiche Tabelle A.16. Auch bei den Rotationen erfolgt die Angabe der Richtigkeit in Millimetern. Dies resultiert aus den Punktabweichungen zwischen den Messungen auf den Standpunkten und Standpunkt 51. Für die Transformation ist jedoch ein virtueller Punkt (Hebel) nötig. Dieser dieser wird als deterministisch angenommen und liegt jeweils in 3 m Entfernung in entsprechenden Koordinatenrichtungen X,Y und Z. Für weitere Details wird auf Ehrhorn (2019, S. 42) verwiesen. Auch bei den Rotationen sind steigende Differenzen bei größeren Entfernungen und Verdrehungen zwischen T-Probe und Lasertracker zu verzeichnen. Hier liegen die Werte bei 20 m Entfernung und ca. 45° Verdrehung bei ca. 2 mm. Diese werden zugleich als signifikant ermittelt. Dies trifft auch auf weitere Werte zu, vergleiche Tabelle A.17. Zum Teil werden Abweichungen als signifikant erkannt, obwohl andere Abweichungen kleiner sind. Dies resultiert z.B. aus den unterschiedlichen Unsicherheiten der ermittelten Transformationsparameter. Des Weiteren sind Korrelationen, welche zwischen den Transformationsparametern bzw. den Beobachtungen bestehen, zu nennen (Ehrhorn, 2019). Für die Berechnung werden voll besetzte VKM verwendet.

6.2.3 Fazit

Es ist festzustellen, dass die einzelnen Größen bei der 6 DoF-Messung nicht normalverteilt sind. Da es sich bei den 6 DoF nicht um originäre Messwerte handelt, kann es durchaus zu Mischverteilungen kommen. Bei Betrachtung der in der Abbildung 6.4 dargestellten Histogramme fällt auf, dass die Verteilung der Häufigkeiten asymmetrisch ist und zum Teil mehrere Maxima auftreten. Visuell ist keine einzelne bekannte WDF festzustellen. Für eine detailliertere Betrachtung wären weiterführende Untersuchungen durchzuführen. Hierbei sollte die Anzahl der Messungen weiter erhöht werden, um eine bessere statistische Sicherheit zu haben. Des Weiteren wäre eine Betrachtung von externen Einflüssen näher zu untersuchen. Hierzu gehören unterschiedliche Beleuchtungen bzw. die atmosphärischen Bedingungen. Darauf wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch verzichtet. Für die im Folgenden durchgeführte Unsicherheitsmodellierung wird von einer Normalverteilung ausgegangen, siehe Abschnitt 6.3.4.

Bei den berechneten Werten der Präzision ist eine Tendenz eines entfernungsabhängigen Anteils bei den Translationen und den Rotationen zu beobachten. Für die Translationen wird dies auch vom Hersteller angegeben, vergleiche Hexagon (2022a). Bei steigender Verdrehung zwischen Lasertracker und T-Probe ist eine Abnahme statt eines Anstieges bei der Präzision zu erkennen. Der Grund hierfür liegt möglicherweise beim Messverfahren an sich. Ein Erklärung könnte sein, dass sich der Abstand zwischen den LEDs, im Falle von veränderten Distanzen und Orientierungen im Bildraum verändert. Aus einem kleineren Abstand, resultiert auch eine kleinere Abstandsänderung. Dies wird
sich auch auf die Genauigkeiten auswirken. Für eine detaillierte Diskussion wird auf Ehrhorn (2019, S. 58) verwiesen.

Aus den Untersuchungen zur Richtigkeit ist ein entfernungs- und orientierungsabhängiger Trend festzustellen. Im Falle der Translationen ist keine der berechneten Differenzen signifikant, siehe Tabelle A.16. Bei den Rotationen sind einige der Punktdifferenzen signifikant, dies trifft jedoch eher auf die extremeren Standpunkte (längere Distanz und größere Verdrehung) zu, vergleiche Tabelle A.17. Im Falle der Rotationen wird kein entfernungsabhängiger Anteil für die Genauigkeiten seitens des Herstellers angegeben, vergleiche Hexagon (2022a). Es ist festzuhalten, dass die Angaben des Herstellers eher pessimistisch gewählt wurden. Dies ist zu erwarten und dürfte für die meisten praktischen Anwendung ausreichend sein. Aus wissenschaftlicher Sicht wäre hier jedoch eine weiterführende Untersuchung wünschenswert. Hierfür wäre jedoch eine genauere Kenntnis der internen Messprozesse nötig. Des Weiteren ist anzumerken, dass bei den erfolgten Untersuchungen ein statischer Aufbau verwendet wird. Inwieweit eine Übertragung auf eine kinematische Messung möglich ist, bedarf einer weiteren Analyse, worauf hier jedoch verzichtet wird. Einen Ansatz zur Untersuchung von kinematischen Messungen eines Lasertrackers auf einen CCR liefert Ulrich (2016).

Die Untersuchungen, im Speziellen die zur Richtigkeit zeigen, dass Messungen zwischen dem Lasertracker und der T-Probe insbesondere in den Grenzbereichen (Entfernung und Orientierung) vermieden werden sollten. Hier treten gerade im Falle der Rotationen Abweichungen auf, bei welchen die eingangs geforderten Genauigkeitsanforderungen von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm an die k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung überschritten werden. Bei den durchgeführten Testmessungen im Rahmen dieser Arbeit, vergleiche Abschnitt 5.4.1 werden keine Messungen in diesen Bereichen durchgeführt. Für die Anwendung bei der Objekterfassung von industriellen Großstrukturen ist dies jedoch erneut zu bewerten. Dies ergibt sich auch aus der Tatsache, dass die Effizienz einen wesentlichen Vorteil beim k-TLS darstellt. Durch die Begrenzung von Reichweite und Orientierung bei der Georeferenzierung der mobilen Plattform werden jedoch die Effizienz und die Flexibilität (Optimierung des Auftreffwinkels) eingeschränkt.

6.3 Betrachtung der Unsicherheiten der Einzelschritte

Beim k-TLS handelt es sich um einen komplexen Messprozess. Die Abbildung 6.2 zeigt, dass dieser aus mehreren Teilschritten besteht. Diese wiederum unterliegen vielen Einflussgrößen. Hieraus resultiert, dass die Modellierung der Gesamtunsicherheit eine komplexe Fragestellung darstellt. Eine allgemeingültige Vorgehensweise für eine Unsicherheitsmodellierung bei einer k-TLS-basierten 3D-Objekterfassung wird nicht möglich sein. Für die konkrete Umsetzung sind immer die Aufgabenstellung, das verwendete MSS sowie die Umgebung und die Eigenschaften des zu erfassenden Objektes in Betracht zu ziehen. Bei der hier beschriebenen Umsetzung geht es um die 3D-Objekterfassung einer industriell gefertigten Großstruktur. Als Genauigkeit wird dabei $\sigma_{3D} \leq 1$ mm gefordert. Als Messsystem kommt das im Abschnitt 2.7 beschriebene k-TLS-basierte MSS zum Einsatz. Der Messprozess gliedert sich dabei in mehrere Teilschritte. Dies sind die Objekterfassung mit dem Laserscanner, die Systemkalibrierung und die Georeferenzierung der mobilen Plattform, wobei sich die letztere noch in die Stationierung des Lasertrackers, die 6 DoF-Messung zur T-Probe sowie in die iEKF-basierte Einzelpunktprozessierung unterteilt. Die einzelnen Schritte sowie deren Uicherheiten sind in der Abbildung 6.5 abgebildet. Als Hauptschritte sind die Objekterfassung mit dem Laserscanner, die Systemkalibrierung und die Georeferenzierung der mobilen Plattform zu nennen. Wobei letzterer sich noch in die Stationierung des Lasertrackers, der 6 DoF-Messung des Lasertrackers zur T-Probe und der punktweisen Prozessierung mit Hilfe des iEKF unterteilen lässt. Im Folgenden ist beschrieben, wie die Unsicherheiten spezifiziert und bestimmt werden.

Als Datensatz wird eine der beiden im Abschnitt 5.4 vorgestellten k-TLS Messung verwendet. Die Unsicherheitsmodellierung erfolgt anhand der Messung mit dem Seilschlitten. Als Laserscanner wird der Z+F IMAGER 5010 verwendet. Eine detaillierte Beschreibung ist im Abschnitt 5.4.1 zu finden. Die Parameter der Messung sind in der Tabelle 5.1 dargestellt.



Abbildung 6.5: Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten.

6.3.1 Objekterfassung durch den Laserscanner

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Unsicherheiten für die Objekterfassung durch den Laserscanner entspricht im Wesentlichen der des Abschnitt 4.4.2 "Erfassung der Referenzebenen durch Laserscanning ". Auch hier werden für die Unsicherheiten der Messgrößen hz und v die Angaben aus dem Kalibrierprotokoll verwendet, vergleiche Tabelle 4.10. Diese werden im Vergleich zu den Angaben des Datenblattes (Tabelle 4.10 bzw. Z+F (2010)) als realistischer eingeschätzt. Bei der Distanzmessung wird in zwei Anteile unterschieden. Einen Anteil bildet die durch das Intensitätsbasierte Modell (siehe Gleichung 4.23) ermittelte Standardabweichung σ_D . Als Parameter werden die vom Laserscanner erfassten Rohintensitäten (Inc) sowie die Koeffizienten aus der Tabelle 4.11 (IMAGER 5010) verwendet. Hieraus ist ersichtlich, dass es sich bei σ_D um eine abgeleitete Größe handelt. Daher wäre im Rahmen der späteren MCS ein Übergang auf die empirische Varianz der Rohintensitäten und die Unsicherheiten der Parameter die konsequentere Vorgehensweise. Da hierfür jedoch keine Informationen vorliegen, wird σ_D verwendet. Für σ_D wird eine Normalverteilung angenommen. Der vom Hersteller ermittelte Linearitätsfehler $\sigma_{D_{linear}}$, siehe Tabelle 4.10, stellt eine restliche Systematik bei der Distanzmessung dar. Hierfür wird eine Gleichverteilung angenommen. Im Rahmen dieser Prozessierung wird auf die Bildung einer kombinierten Unsicherheit, vergleiche Gleichung 4.24, verzichtet. Beide Größen werden im Rahmen der MCS einzeln betrachtet. Dies entspricht der in Kutterer und Schön (2004) empfohlenen Vorgehensweise. Die Unsicherheiten der Objekterfassung mit dem Laserscanner sind als Vorinformationen zu werten und werden daher als Typ B spezifiziert. Die verwendeten nummerischen Werte sind in der Tabelle 6.3 dargestellt.

6.3.2 Systemkalibrierung zwischen T-Probe und Laserscanner

Die Durchführung der Systemkalibrierung erfolgt nach der im Abschnitt 4.4.2 beschrieben Vorgehensweise. Die der Berechnung entstammenden Standardabweichungen der Parameter sind in der Tabelle 6.3 dargestellt. Im Vergleich zu den im Abschnitt 4.4.3 dargestellten Ergebnissen fällt auf, dass die Standardabweichungen der Rotationen unterschiedlich sind. Dies trifft speziell auf die Rotation $\varphi|_s^b$ zu, welche hier einen um den Faktor drei höheren Wert aufweist. Der Grund hierfür ist eine unterschiedliche RE-Konstellation. In diesem Fall konnten keine RE oberhalb des Laserscanners angebracht werden. Daher weicht die verwendet Konstellation von der im Abschnitt 4.4.2 empfohlenen ab. Für eine detaillierte Interpretation der Standardabweichungen sei auf die abschließende Diskussion im Abschnitt 4.4.3 verwiesen. Die Standardabweichungen der Translationen wirken sich konstant auf die Gesamtunsicherheit aus. Da alle in einem Bereich von < 0,1 mm liegen, ist ihr Einfluss auf die Gesamtunsicherheit jedoch nur wenig signifikant. Der Einfluss der Standardabweichungen der Rotationen steigt dagegen mit wachsender Messentfernung des Laserscanners. Dies trifft insbesondere auf s_{φ} zu, welche mit 3,2 mgon den größten Wert erreicht. Die ermittelten Standardabweichungen sind hier als Typ B zu werten. Zwar entstammen diese einer Ausgleichung basierend auf einem GHM, jedoch wurden die Messungen hierfür im Vorfeld durchgeführt. Daher sind diese als Vorinformationen zu werten. Prinzipiell haben diese Informationen einen ähnlichen Charakter, wie auch die Informationen, welcher durch einen Hersteller im Rahmen von eigenen Untersuchungen, wie z. B. einer Sensorkalibrierung, ermittelt und anschließend im Datenblatt veröffentlicht werden.

6.3.3 Georeferenzierung der mobilen Plattform

Die Unsicherheit der Georeferenzierung setzt sich bei dem hier verwendeten k-TLS-basierten MSS aus den beiden Teilschritten *Stationierung des Lasertrackers* und der *6 DoF-Messung* des Lasertrackers (Leica AT960) zur am Laserscanner montierten T-Probe zusammen.

Stationierung des Lasertrackers

Die Stationierung eines Sensors, wie z.B. eines Lasertrackers, stellt eine klassische Aufgabe in der Ingenieurgeodäsie dar. Sie bildet die Grundlage um Messungen von mehreren Standpunkten miteinander zu verknüpfen bzw. diese in ein einheitlichen übergeordnetes Koordinatensystem zu überführen. Erfolgt die 3D-Objekterfassung von mehreren Standpunkten, so ist dieser Schritt entsprechend mit zu berücksichtigen. Die Vorgehensweise wird im Abschnitt 2.7.3 erläutert.

Im konkreten Fall (Messung Seilschlitten) wurden mit einem Leica AT960 zu allen neun Referenzpunkten, siehe Abbildung 5.6, Messungen durchgeführt. Diese Punkte sind jeweils mit den in der Abbildung 2.8 dargestellten magnetischen Nestern vermarkt und werden je mit einem CCR bestückt. Da diese Messungen jedoch gleichzeitig für die Realisierung des übergeordneten Referenznetzes r verwendet werden, ist in diesem Fall keine Stationierung im klassischen Sinne nötig. Im Standardfall kann r jedoch als getrennt betrachtet werden. Hier liegen die Koordinaten der Referenzpunkte in r vorab vor und können für die Stationierung verwendet werden.

Um an dieser Stelle Ergebnisse einer Stationierung eines Leica AT960 zu zeigen, erfolgt hier beispielhaft die Darstellung einer Messung im Labor des GIH. Die Vorgehensweise entspricht dabei der vorab beschriebenen. Insgesamt werden sechs Punkte angemessen. Aus den polaren Messelementen werden die kartesischen Koordinaten berechnet, vergleiche Gleichung 2.1. Diese stellen die Beobachtungen in l dar. Die Ermittlung der Unsicherheiten erfolgt durch VF, vergleiche Abschnitt 3.2.3.1. Für die polaren Messelemente werden die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten verwendet, vergleiche Tabelle 2.7. Des Weiteren werden die Koordinaten der Referenzpunkte in r als Beobachtungen eingeführt. Hierfür liegen Standardabweichungen aus einer a-priori durchgeführten Netzmessung vor. Die verwendeten Koordinaten in l und r sowie deren Standardabweichungen sind in den Tabellen A.6 und A.7 dargestellt. Bei der Aufstellung der entsprechenden VKM werden keine Korrelationen zwischen den Koordinaten betrachtet.

Für den Übergang zwischen den Koordinatensystemen werden insgesamt sieben Parameter benötigt, siehe Abschnitt 3.1. Der Vorgang wird als Helmert-Transformation bezeichnet. Wird der Maßstab mit m = 1 festgelegt, ergibt sich der funktionale Zusammenhang aus der Gleichung 2.4. Die Schätzung der gesuchten Transformationsparameter erfolgt in einem GHM, vergleiche hierzu Abschnitt 3.3. Für eine detailliertere Darstellung sei auf Paffenholz und Bae (2012) verwiesen. Die Lösung des GHM erfolgt dabei iterativ. Die Berechnung wird abgebrochen, wenn eine Änderung der Translationen von < 0,1 mm und der Rotationen von < 0,00006366 gon erreicht werden. Die gesuchten Parameter und deren Standardabweichung *s* ergeben sich schließlich mit Hilfe der Gleichungen 3.53. Sie sind in der Tabelle 6.2 dargestellt. Es ist zu erwähnen, dass die dargestellten Standardabweichungen in der Tabelle 6.2 Präzisionen darstellen. Sie sind abhängig vom stochastischen Modell. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass weitere systematische Effekte existieren können, welche hier nicht betrachtet werden. Bezüglich der dargestellten Standardabweichungen aus der Ausgleichung ist festzuhalten, dass diese sehr gering sind. Eine Berücksichtigung bei der Modellierung der Gesamtunsicherheit ist daher vernachlässigbar. Dies zeigt sich am Beispiel eines Punktes, welcher in einer Entfernung von 50 m zum Koordinatenursprung liegt. Nach der Transformation

Translationen	s (a-posteriori)	Rotationen	s (a-posteriori)
$t_X _l^r$	$0.0031 \mathrm{~mm}$	$ \omega _l^r$	0.072 mgon
$t_Y _l^r$	$0.0035~\mathrm{mm}$	$ arphi _l^r$	0.067 mgon
$t_Z _l^r$	$0.0041~\mathrm{mm}$	$\kappa _l^r$	$0.051 \mathrm{mgon}$

Tabelle 6.2: A-posteriori Standardabweichungen der Parameter der Lasertrackerstationierung.

würde dieser eine 3D-Unsicherheit von weniger als 0,1 mm haben. Da die Distanzen bei der konkreten Umsetzung geringer sind, wird dies hier nicht betrachtet. Es ist jedoch anzumerken, dass die Unsicherheiten in einem industriellen Umfeld in welchem z. B. Vibrationen oder starke Temperaturgefälle auftreten können ansteigen. Des Weiteren kann sich die Qualität des Referenznetzes, hierzu zählen z. B. die Punktvermarkung oder eine weniger gute Verteilung, auswirken. Daher ist immer für den Einzelfall zu beurteilen, inwiefern sich die Unsicherheiten der Stationierung auf die Gesamtunsicherheiten auswirken und entsprechend mit betrachtet werden sollten.

Messung 6 DoF zwischen Lasertracker und T-Probe

Die Georeferenzierung der mobilen Plattform b erfolgt durch einen Lasertracker l, welcher auf ein T-Probe misst. Weitere Details sind im Abschnitt 2.7.3 beschrieben. Als Resultat stehen die 6 DoF zwischen b und l direkt zur Verfügung. Die Transformation ergibt sich durch Gleichung 2.3. Die Synchronisierung zwischen Laserscanner und Lasertracker erfolgt durch ein Triggersignal, welches der Laserscanner bei jedem Nulldurchgang seines Profiles erzeugt. Für eine detaillierte Beschreibung, sei auf den Abschnitt 2.7.2 verwiesen. Die verwendete Kabel-basieren Lösung führt nur zu einer sehr geringen Verzögerung. Diese wird mit < 0,75 µs abgeschätzt, vergleiche Abschnitt 2.7.2. Bei einer Plattformgeschwindigkeit von 1 m/s, ergibt sich eine Abweichung von 0,75 µm. Daher wird die Synchronisierung hier im konkreten Fall nicht als Unsicherheitsquelle betrachtet. Um die Unsicherheiten der Lasertrackermessungen zur T-Probe besser bewerten zu können werden eigene Untersuchungen durchgeführt. Diese sind im Abschnitt 6.2 erläutert. Im Rahmen der Untersuchungen werden die Angaben des Herstellers zum größten Teil bestätigt. Lediglich in einigen

Grenzbereichen der Messung (große Entfernung und Verkippung) sind diese nicht passend. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten werden daher verwendet. Daher sind diese dem Typ B nach GUM zuzuschreiben. Die Angaben des Herstellers werden durch zusätzliche eigene Untersuchungen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit überprüft. Eine detailliertere Darstellung ist im Abschnitt 6.2 gegeben. Wie im GUM beschrieben, werden die angegebenen Werte hier in Standardunsicherheiten, welche der Normalverteilung entsprechen, umgewandelt. Dies erfolgt nach Gleichung 3.25. Weitere Informationen können dem Abschnitt 5.3.2 entnommen werden. Die Matrix Q_{ll} enthält schließlich die Unsicherheiten der einzelnen Größen, vergleiche Gleichung 5.10. Auf die Einführung von Korrelationen wird an dieser Stelle verzichtet. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass dies zu zu optimistischen Unsicherheiten führen kann. Die in der Matrix Q_{ll} zusammengefassten Unsicherheiten, stellen wiederum Vorinformationen für die punktweise Prozessierung dar, welche im Rahmen eines iEKF erfolgt. Hierauf wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

Punktweise Prozessierung - iEKF

Wie im Abschnitt 5.3 beschrieben, wird für die punktweise durchgeführte Georeferenzierung ein Filtermodell verwendet. Die 6 DoF-Messungen zwischen Lasertracker und T-Probe stellen dabei die Beobachtungen der einzelnen Zustände zur Epoche (k) dar. Dieser Zustand gilt streng genommen nur für den ersten Punkt im Profil. Dieses besteht jedoch aus mehreren Punkten, vergleiche Tabelle 5.1. Bewegt sich die Plattform während der Profilmessung des Laserscanners fort, muss der Zustand für den Zeitpunkt der Punktmessung prädiziert werden. Dies erfolgt im Rahmen eines Prädiktionsschrittes, welcher Teil eines implementierten iEKF ist, vergleiche hierzu Abschnitt 5.3.2. Für die

Übertragung wird die Transitionsmatrix Φ (Gleichung 3.110) verwendet. Die Berechnungsgrundlage für die Prädiktion bilden die Bewegungsgleichungen, siehe Gleichung 5.13. Die Vorgehensweise hierbei wird in den Abschnitten 3.5.2 bzw. 3.5.3 beschrieben. Die resultierenden Unsicherheiten sind dabei in der Matrix $Q_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)}$ enthalten, vergleiche Gleichung 3.110. Hierfür wird das Systemrauschen, welches durch die Matrix Q_{ww} definiert ist, verwendet. Durch Modellierung des Systemrauschens ist es möglich Abweichungen zu berücksichtigen, welche sich durch den gewählten Bewegungstyp ergeben. Des Weiteren werden hierdurch die Beobachtungs- und Bewegungsgleichungen gegeneinander gewichtet. Für die hier gewählte Prozessierung wurden konstante Beschleunigungen angenommen. Das Systemrauschen ergibt sich somit aus den Gleichungen 5.8 und 5.9.

Wie im Abschnitt 5.3.2 beschrieben wird eine Glättung, indem die Filterung vorwärts als auch rückwärts erfolgt, durchgeführt. Hierdurch ist es ermöglicht, dass die Prädiktion für die erste Hälfte des Profils vom Zustand (k - 1) erfolgt. Im Falle der zweiten Hälfte wird der Folgezustand (k) verwendet. Im Rahmen des Filterungsschrittes werden die Beobachtungen, im konkreten Fall die 6 DoF zwischen Lasertracker und T-Probe, eingeführt. Die Lösung der Näherung des Zustandsvektor erfolgt iterativ. Die Unsicherheiten der Beobachtungen werden im Rahmen des Beobachtungsrauschen berücksichtigt. Dieses wird durch die Matrix Q_{ll} repräsentiert, vergleiche Gleichung 5.1.

Die Unsicherheiten der punktweisen Prozessierung, welche für jede Epoche k im Rahmen des implementierten iEKF erfolgt, sind der Matrix $Q_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)}$ zu entnehmen. Da es sich hierbei um ein statistisches Verfahren handelt, gilt hierfür nach dem GUM der Typ A. Als WDF wird die Normalverteilung angenommen.

6.3.4 Zusammenstellung der Unsicherheiten für die Einzelschritte

Eine Zusammenstellung der einzelnen unsicherheitsbehafteten Größen, sowie deren WDF und Spezifikation nach GUM sind in der Tabelle 6.3 zusammengefasst. Die Größen $X_1 - X_4$ betreffen die

Cröße	r	Гур		Unsicherheit		
Grobe	Abweichung	WDF	GUM		nern	en
X_1	zufällig	Normal	В	σ_{hz}	=	$0,003^{\circ}$
X_2	zufällig	Normal	В	σ_v	=	0,004°
X_3	zufällig	Normal	В	σ_D	=	f(Inc)
X_4	systematisch	Gleich	В	$(a_+ - a)/2$	=	$0,4 \mathrm{mm}$
X_5	zufällig	Normal	В	s_{t_X}	=	$0,05 \mathrm{~mm}$
X_6	zufällig	Normal	В	s_{t_Y}	=	$0,03 \mathrm{mm}$
X_7	zufällig	Normal	В	s_{t_Z}	=	$0,03 \mathrm{mm}$
X_8	zufällig	Normal	В	s_ω	=	0,7 mgon
X_9	zufällig	Normal	В	s_{arphi}	=	3,2 mgon
X_{10}	zufällig	Normal	В	s_κ	=	0,4 mgon
X ₁₁	zufällig	Normal	A/B	σ_{t_X})	
X_{12}	zufällig	Normal	A/B	σ_{t_Y}		
X_{13}	zufällig	Normal	A/B	σ_{t_Z}		$\mathbf{O}^{(k)}$
X_{14}	zufällig	Normal	A/B	σ_{r_X}	ſ	$\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x},-}$
X_{15}	zufällig	Normal	A/B	σ_{r_Y}		
X_{16}	zufällig	Normal	A/B	σ_{r_Z}	J	

Tabelle 6.3: Spezifikationen und numerischen Werte der Unsicherheiten der Eingangsgrößen, welche
für die Modellierung der 3D-Gesamtunsicherheit durch die MCS, verwendet werden.

3D-Objekterfassung mit dem Laserscanner, $X_5 - X_{10}$ die Systemkalibrierung und $X_{11} - X_{16}$ die Georeferenzierung der mobilen Plattform. An dieser Stelle sein nochmals darauf hingewiesen, dass

die Größe X_4 (Standardabweichung der Distanzmessung des Laserscanners σ_D) für jeden Punkt neu berechnet wird. Dies ergibt sich aufgrund der Abhängigkeit von der Rohintensität *Inc*, welche für jeden Punkt zur Verfügung steht, vergleiche Gleichung 4.23. Die Parameter $X_{11} - X_{16}$ werden der Spur der Matrix $Q_{\hat{x}\hat{x},-}^{(k)}$ entnommen. Sie gelten pro Zustand k, dass bedeutet profilweise.

6.4 Modellierung der Gesamtunsicherheit

In diesem Abschnitt wird die Modellierung der Gesamtunsicherheit für eine k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung erläutert. Verwendet wird dafür das im Abschnitt 2.7 beschriebes MSS. Als Ergebnis steht für jeden Einzelpunkt die 3D Gesamtunsicherheit zur Verfügung. Dieser kann als Helmertscher Punktfehler in 3D interpretiert werden. Die Bestimmung erfolgt als Vorwärtsmodellierung. Aufgrund der im Abschnitt 6.1 erläuterten Nachteile bei der klassischen VF, hierzu zählen die Annahme der Normalverteilung und die auftretenden Abweichungen aufgrund unzureichender Linearisierung, wird eine MCS verwendet.

Die Modellierung erfolgt dabei für die drei wesentlichsten Teilschritte. Dies sind: die Objekterfassung durch den Laserscanner, die Systemkalibrierung zwischen T-Probe und Laserscanner sowie die Georeferenzierung der mobilen Plattform. Deren Spezifikation und Ermittlung werden in den Abschnitten 6.3.1 - 6.3.3 erläutert. Der funktionale Zusammenhang wird durch die Gleichungen 2.2 -2.4 dargestellt. Die Unsicherheiten der Stationierung des Lasertrackers werden in dieser Umsetzung nicht betrachtet, vergleiche hierzu Abschnitt 6.2.1.

6.4.1 Umsetzung der Vorwärtsmodellierung

Wie im Abschnitt 3.2.3.2 beschrieben, werden die unsicherheitsbehafteten Größen mit Hilfe ihrer WDF und der dazugehörigen Unsicherheit verrauscht. Der Ablauf der MCS ist in der Abbildung 3.4 dargestellt. Als Stichprobenanzahl wird die in der Literatur (siehe Heunecke u. a. (2013, S. 142)) empfohlene Menge von M = 100.000 verwendet. Nach Festlegung von M werden die Punkte entsprechend verrauscht. Dieser Prozess wird M Mal wiederholt. Anschließend werden pro Punkt der Mittelwert und die dazugehörige Standardabweichung aus allen M Stichproben berechnet. Die Standardabweichung gibt Auskunft über die Unsicherheit des Einzelpunktes. Unter Berücksichtigung der Verrauschung aller Größen ergibt sich der folgende funktionale Zusammenhang für eine Stichprobe des Punkt in l aus

$$\tilde{\boldsymbol{x}}|_{s} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{s} = \begin{bmatrix} (D+r_{D}+r_{Dlin})\cdot\cos\left(v+r_{v}\right)\cdot\cos\left(hz+r_{hz}\right) \\ (D+r_{D}+r_{Dlin})\cdot\cos\left(v+r_{v}\right)\cdot\sin\left(hz+r_{hz}\right) \\ (D+r_{D}+r_{Dlin})\cdot\sin\left(v+r_{v}\right) \end{bmatrix}_{s},$$
(6.1)

$$\tilde{\boldsymbol{x}}|_{b} = \tilde{\boldsymbol{R}}|_{s}^{b} \cdot \tilde{\boldsymbol{x}}|_{s} + \begin{bmatrix} t_{X} + r_{t_{x}} \\ t_{Y} + r_{t_{y}} \\ t_{Z} + r_{t_{z}} \end{bmatrix}_{s}^{b} \quad \text{mit} \quad \tilde{\boldsymbol{R}}|_{s}^{b} = \boldsymbol{R}(\kappa + r_{\kappa})|_{s}^{b} \cdot \boldsymbol{R}(\varphi + r_{\varphi})|_{s}^{b} \cdot \boldsymbol{R}(\omega + r_{\omega})|_{s}^{b} \quad (6.2)$$

und

$$\tilde{\boldsymbol{x}}|_{l} = \tilde{\boldsymbol{R}}|_{b}^{l} \cdot \tilde{\boldsymbol{x}}|_{b} + \begin{bmatrix} t_{X} + r_{t_{x}} \\ t_{Y} + r_{t_{y}} \\ t_{Z} + r_{t_{z}} \end{bmatrix}_{b}^{l} \quad \text{mit} \quad \tilde{\boldsymbol{R}}|_{b}^{l} = \boldsymbol{R}(\kappa + r_{\kappa})|_{b}^{l} \cdot \boldsymbol{R}(\varphi + r_{\varphi})|_{b}^{l} \cdot \boldsymbol{R}(\omega + r_{\omega})|_{b}^{l}.$$
(6.3)

Abweichend von der Darstellung im Abschnitt 3.2.3.2 werden die Zufallszahlen hier mit r bezeichnet. Die Generierung erfolgt mittels Cholesky-Zerlegung und unter Berücksichtigung der entsprechenden VKM. Für die Generierung der Zufallszahlen wurde MATLAB verwendet. Die Normalverteilung ergibt sich mit der Funktion *randn* und die Gleichverteilung mit *rand*. Es ist darauf zu achten, dass jede der Zufallszahlen aus M für eine Realisierung steht. Daher sind alle Punkte über die gleiche Realisierung korreliert. Dies trifft auf die Systemkalibrierung zu. Hierbei werden für jeden Punkt die gleichen Zufallszahlen verwendet, da davon auszugehen ist, dass sich die Parameter während der Messung nicht ändern. Auf das Thema Korrelationen zwischen den einzelnen Punkten des k-TLS basierten MSS wird im Abschnitt 6.4.3 eingegangen.

6.4.2 Darstellung der Ergebnisse

In Rahmen diese Abschnittes werden die Ergebnisse der Unsicherheitsmodellierung, vergleiche hierzu Abschnitt 6.3.1, dargestellt. Hierzu werden zunächst die Unsicherheiten der Einzelschritte betrachtet. Abschließend wird die 3D Gesamtunsicherheit dargestellt.

Georeferenzierung der mobilen Plattform

Der Abbildung 6.6 ist zu entnehmen, dass die modellierten Unsicherheiten im Bereich zwischen 0,57 und 0,88 mm liegen. Wie erwartet, dominiert hier der Anteil der Rotationen. Dies zeigt sich an der unterschiedlichen Färbung. Der Grund hierfür sind die unterschiedlichen Messdistanzen zum Mockup. Diese beträgt in der linken unteren Ecke (blaue Färbung) ca. 4 m. In der oberen rechten Ecke (rote Färbung) sind es hingegen ca. 7 m. Die höchsten Werte mit > 0,78 mm werden in der oberen rechten Ecke erreicht.



Abbildung 6.6: Modellierte Unsicherheiten der Georeferenzierung in [mm].

Systemkalibrierung

Die ermittelten Unsicherheiten der Systemkalibrierung sind in der Abbildung 6.7 dargestellt. Die Unsicherheiten liegen in einem Bereich von 0,24 - 0,42 mm. Sie sind damit nur halb so groß wie die modellierten Unsicherheiten der Georeferenzierung. Auch in diesem Fall dominiert der Einfluss

der Rotationen. Dies zeigt sich an der unterschiedlichen Färbung. Auch hier ist dies auf die unterschiedliche Messdistanz zurückzuführen. Die höchsten Werte > 0,36 mm liegen in der oberen rechten Ecke des Mockups.



Abbildung 6.7: Modellierte Unsicherheiten der Systemkalibrierung in [mm].

Objekterfassung durch den Laserscanner

Die modellierten Unsicherheiten der Objekterfassung mit dem Laserscanner sind in der Abbildung 6.8 dargestellt.



Abbildung 6.8: Modellierte Unsicherheiten der Objekterfassung mit dem Laserscanner in [mm].

Auch bei der Objekterfassung mit dem Laserscanner ist ein großer Einfluss der Rotationen zu erkennen, vergleiche unterschiedliche Färbung von unten links zu oben rechts. Es ist jedoch anzumerken, dass auch die Unsicherheit der Distanz eine entscheidende Rolle spielt. Dies ist vor allem in den Bereichen sichtbar, welche flachere Auftreffwinkel aufweisen. Dies zeigt sich an den Rändern der Bullaugen sowie an der horizontalen zylinderförmigen Struktur (Scheuerleiste) im unteren rechten Bereich. Die Unsicherheiten liegen in einem Bereich von 0,53 bis 0,88 mm. Die höchsten Unsicherheiten mit > 0,70 mm werden im oberen rechten Bereich bzw. an den Kanten der Bullaugen und der Scheuerleiste erreicht. Hierbei ist festzuhalten, dass sich die Unsicherheiten aufgrund des Kanteneffekts um einen Betrag von 0,1 bis 0,3 mm erhöhen. Dies ist auf die ansteigende Unsicherheit bei der Distanzmessung zurückzuführen. Verdeutlicht wird dies auch aus der Einzeldarstellung der Unsicherheiten der Distanzmessung, welche in der Abbildung 6.9 dargestellt sind.



Abbildung 6.9: Abgeleitete Unsicherheiten (σ_D) aus Rohintensitäten der Distanzmessung in [mm].

Hierbei werden Werte zwischen 0,36 und 0,72 mm erreicht. Während die Unsicherheiten am Mockup im Schnitt zwischen 0,3 und 0,4 mm liegen, steigen diese an den Rändern der Scheuerleiste und der Bullaugen auf Werte zwischen 0,4 und 0,7 mm an.

Gesamtunsicherheit

Die modellierten 3D Gesamtunsicherheiten werden in der Abbildung 6.10 dargestellt.

Die Unsicherheiten liegen in einem Bereich von 0,60 bis 0,95 mm. Auch hier ist eine unterschiedliche Einfärbung von unten links nach oben rechts zu erkennen. Dieser Effekt zeigt sich auch in den Darstellungen der Einzelunsicherheiten vergleiche Abbildungen 6.6 - 6.8. Eine verstärkte Unsicherheit an den Kanten ist nicht festzustellen. Dies scheint darauf zurückzuführen sein, dass die Unsicherheit der Georeferenzierung im Vergleich zur Objekterfassung mit dem Laserscanner einen signifikanteren Einfluss auf die Gesamtunsicherheit hat.

Die Ergebnisse der Unsicherheitsmodellierung zeigen das eine Gesamtunsicherheit von < 1 mm möglich ist. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Messentfernung zwischen Laserscanner und Objekt einer der wesentlichen begrenzenden Faktoren ist. Bei der erfolgten Messung beträgt diese 4 - 7 m. Unter Annahme der hier ermittelten Einzelunsicherheiten ist festzuhalten, dass die Messentfernung nicht weiter wesentlich erhöht werden sollte. Für weitere Entfernungen sind die Einzelunsicherheiten weiter zu reduzieren. Anhand der Standardabweichungen der Systemkalibrierung im Abschnitt 4.4.3 wird gezeigt, dass eine Verringerung der Werte im Vergleich zu den hier eingeführten Werten möglich ist, vergleiche Tabelle 6.3.



Abbildung 6.10: Modellierte Gesamtunsicherheiten der k-TLS-basierten Objekterfassung in [mm].

6.4.3 Korrelationen

Im Rahmen dieses Abschnittes wird ein kurzer Einblick in die Thematik Korrelationen beim der k-TLS-basierten 3D-Objekterfassung gegeben. Eine umfangreiche Analyse ist aufgrund der Größe des Datensatzes und der Komplexität bei der Bestimmung jedoch schwierig. Entscheidend für die Berechnung der Korrelationen zwischen zwei Punkten, welche mit dem k-TLS-basierten MSS erfasst wurden, ist die Modellierung der Korrelation der Eingangsgrößen im funktionalen Modell. Liegen für diese wenig bis keine Information vor, so werden häufig keine Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen angenommen. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Generierung der korrelierten Zufallszahlen sehr rechenaufwendig ist. Die benannten Punkte stellen auch für diese Arbeit die Gründe dar, weshalb auf eine flächendeckende Berechnung der Korrelationen verzichtet wurde.

Trotzdem soll an dieser Stelle kurz auf die Schwierigkeiten eingegangen werden, welche sich bei der Bestimmung ergeben. Ein Beispiel sind die Korrelationen, welche sich aus der räumlichen Nachbarschaft zweier Punkte am Objekt ergeben. Hierfür existieren einige Ansätze, welche diesen Aspekt mit berücksichtigen, vergleiche hierzu Abschnitt 6.1. Jedoch erfolgen die Untersuchungen ausnahmslos am Beispiel des s-TLS. Eine direkte Übertragung auf das k-TLS scheint auf Grund des komplexeren funktionalen Zusammenhanges nicht möglich. Beim k-TLS erfolgt die Objekterfassung im Vergleich zum s-TLS meist weniger gleichmäßig. Grund hierfür ist die Bewegung der mobilen Plattform, welche zum Teil sehr dynamisch erfolgt. Hieraus resultiert, dass benachbarte Punkte nicht immer gleichmäßig verteilt liegen. Dies betrifft die Punkte eines Profils als auch die benachbarter Profile. Eine Alternative zur räumlichen Betrachtung ist die Zeit-basierte. Hierbei wird die zeitliche Folge der Messungen betrachtet. Unter der Voraussetzung von konstanten Abständen, scheint hier im Falle des k-TLS eine Alternative zu liegen. Weitere mögliche zeitliche Korrelationen bestehen zwischen den unterschiedlichen 6 DoF bei der punktweisen Georeferenzierung, da diese über den selben Zustand (Profil) des iEKF berechnet werden.

Um einen besseren Eindruck über das Thema Korrelationen bei der Objekterfassung mit dem verwendeten k-TLS-basierten MSS zu bekommen, werden beispielhaft vier zufällig gewählte Punkte ausgewählt, siehe Abbildung 6.11. Für diese werden im Rahmen der MCS die Korrelation bestimmt. Ein Darstellung der einzelnen Koordianten erfolgt in der Tabelle 6.4. Dabei entsprechen X_1, Y_1 und Z_1 den Koordinaten von Punkt 1. Für die weiteren Punkte gilt dies entsprechend. In der Tendenz zeigt sich, dass zwischen der X- und Y-Koordinate innerhalb eines Punktes Korrelation im Bereich von -0,34 bis -0,63 auftreten. Diese sind vorrangig auf das funktionale Modell zurückzuführen. Aus



Abbildung 6.11: Intensitätswerte (Grauwerte) sowie der zufällig ausgewählte Punkte 1-4, welche zur Berechnung der Korrelation verwendet werden, Abbildung aus Ehrhorn (2019).

dem funktionalen Zusammenhang in Gleichung 6.1 ist erkenntlich, dass hier alle polaren Messelemente (hz, v und D) eingehen. Die X- und die Z-Koordinate eines Punkts sind hier quasi nicht korreliert. Auch bei den Korrelationen zwischen Y und Z sind mit Ausnahme des Punktes 1 keine starken Korrelationen zu beobachten.

	X_1	Y_1	Z_1	X_2	Y_2	Z_2	X_3	Y_3	Z_3	X_4	Y_4	Z_4
X_1	1,00	-0,34	-0,18	0,02	0,05	-0,08	0,01	0,03	-0,09	0,01	0,07	-0,09
Y_1	-0,34	1,00	-0,61	0,03	$0,\!12$	-0,21	0,03	0,07	-0,22	0,06	$0,\!17$	-0,20
Z_1	-0,18	-0,61	1,00	-0,04	-0,14	0,24	-0,01	-0,09	0,24	-0,05	-0,18	0,23
X_2	0,02	0,03	-0,04	1,00	-0,59	-0,08	0,03	0,01	-0,04	0,03	0,04	-0,03
Y_2	0,05	0,12	-0,14	-0,59	1,00	-0,14	-0,01	0,04	-0,13	0,03	0,09	-0,13
Z_2	-0,08	-0,21	0,24	-0,08	-0,14	1,00	-0,02	-0,05	0,24	-0,06	-0,19	0,23
X_3	0,01	0,03	-0,01	0,03	-0,01	-0,02	1,00	-0,63	-0,00	0,02	0,02	-0,03
Y_3	0,03	0,07	-0,09	0,01	0,04	-0,05	-0,63	1,00	0,15	0,02	0,04	-0,06
Z_3	-0,09	-0,22	0,24	-0,04	-0,13	0,24	-0,00	$0,\!15$	1,00	-0,07	-0,22	$0,\!25$
X_4	0,01	0,06	-0,05	0,03	0,03	-0,06	0,02	0,02	-0,07	1,00	-0,37	-0,13
Y_4	0,07	0,17	-0,18	0,04	0,09	-0,19	0,02	0,04	-0,22	-0,37	1,00	-0,25
Z_4	-0,09	-0,20	0,23	-0,03	-0,13	0,23	-0,03	-0,06	0,25	-0,13	-0,25	1,00

Tabelle 6.4: Korrelation zwischen den Koordinaten zufällig gewählten Punkte 1-4 (Ehrhorn, 2019).

Bei dem Vergleich der Punkte untereinander fällt auf, dass die Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Z-Koordinaten häufig im Bereich von 0,2 bis 0,25 liegen. Außerdem ist hier festzustellen, dass die X-Koordinate eines Punktes mit keiner anderen Koordinate eine Korrelation aufweist (< 0,1 für alle X). Die Y- und die Z-Koordinate unterschiedlicher Punkte sind ebenfalls nur leicht miteinander korreliert. Bei den Z-Koordinaten untereinander bestehen hingegen erhöhte Korrelationen, welche um 0,25 liegen.

Die Korrelationen bei der Modellierung sind wie eingangs erwähnt hier lediglich auf das funktionale Modell (Umrechnung polar in kartesisch, Gleichung 6.1) und die Systemkalibrierung zurückzuführen. Die Korrelation zwischen den einzelnen Koordinatenkomponenten haben ihren Ursache im funktionalen Modell. Da in der Umsetzung der MCS zwischen zwei Punkten kein funktionaler Zusammenhang besteht, sind diese Korrelationen nur durch die Systemkalibrierung zu begründen. Es ist jedoch festzuhalten, dass im Falle einer vollständigen Modellierung der Korrelationen der Eingangsgrößen des funktionalen Modells und der Berücksichtigung in der Umsetzung der Fortpflanzung noch deutlich höhere Korrelationen zu erwarten sind. Dies gilt vor allem für Punkte, welche innerhalb eines Profil des Laserscanners liegen. Da für diese der gleiche Zustand der Georeferenzierung genutzt wird, ist hier von zusätzlichen Korrelationen zwischen den einzelnen Punktmessungen auszugehen. Auf die hier vier ausgewählten Punkte wird dies jedoch weniger zutreffen. Dies ist mit deren zufälliger Verteilung und den größeren räumlichen Abständen zu begründen.

6.5 Validierung der Modellierungsergebnisse

In diesem Abschnitt wird auf die Validierung der durchgeführten Modellierung der Gesamtunsicherheit einer k-TLS-basierten 3D-Objekterfassung eingegangen. Dieser Schritt ist von Relevanz, um die durchgeführte Prozessierung zu bewerten. Hierfür wird eine Referenzdatensatz verwendet, welcher mit einem Leica AT901 und einer Leica T-Scan erfasst wurde. Als Datensatz für die Vorwärtsals auch Rückwärtsmodellierung wird die k-TLS Messung verwendet, welche mit einem Seilschlitten erfasst wurde, vergleiche Abschnitt 5.4.1. Die Prozessierung der Daten erfolgte durch einen iEKF, welcher vorwärts als auch rückwärts (Glättung) angewendet wurde. Die Vorgehensweise bei der Rückwärtsmodellierung wird im folgenden Abschnitt beschrieben. Im Anschluss erfolgt eine Bewertung der Ergebnisse. Abschließend werden ein Fazit und ein Ausblick gegeben.

6.5.1 Rückwärtsmodellierung

Die Grundidee bei der Rückwärtsmodellierung besteht aus einem Vergleich der erfassten k-TLS Daten mit einem hochgenauen Referenzdatensatz. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete T-Scan Datensatz besitzt eine um den Faktor zehn höhere Genauigkeit, vergleiche hierzu Abschnitt 5.4.2. Grundlage für den Vergleich bilden M3C2-Distanzen. Diese werden zwischen den k-TLS Daten und den Referenzdaten berechnet. Für die Details des verwendeten M3C2-Algorithmus sei auf Lague u. a. (2013) verwiesen. Bei der Prozessierung wurden für jeden der k-TLS-Punkte eine M3C2-Distanz berechnet. Diese bieten die Möglichkeit, die Genauigkeit der erfassten k-TLS Daten zu bewerten. Die berechneten Werte der k-TLS-Messung mit dem Seilschlitten sind in der Abbildung 5.13 dargestellt. Der Mittelwert der M3C2-Distanzen beträgt 0,2 mm und die einfache Standardabweichung 0,6 mm.

Nach Betrachtung der Bereiche, welche M3C2-Distanzen außerhalb der geforderten Gesamtgenauigkeit aufweisen, können zwei wesentliche Effekte klassifiziert werden. Zum einen tritt ein streifenhaftes Muster, siehe gelbe bis orange Einfärbungen in der Abbildung 5.13, auf. Die Ursache hierfür ist eine leichte Pendelbewegung des Seilschlittens, welche um die Z-Achse im Referenzsystem r erfolgt. Da diese durch das verwendete Bewegungsmodell im Rahmen der iEKF-Prozessierung nicht berücksichtigt wird, verbleibt dieser Effekt in den k-TLS Daten. eine Möglichkeit um dies zu kompensieren ist eine Anpassung des Bewegungsmodell. Weitere Optionen wären eine Erhöhung der Messrate bei der Georeferenzierung und eine bessere Dämpfung der mobilen Plattform. Für weitere Details sei auf den Abschnitt 5.5 verwiesen.

Des Weiteren fällt auf, dass es in den Kantenbereichen zu M3C2-Distanzen kommt, welche ≥ 1 mm überschreiten. Dies trifft vor allem auf die Randbereiche der Zielmarken, der Bullaugen und der Scheuerleiste (horizontaler Zylinder) zu. Im Falle der Bullaugen und der Zielmarken sind vorrangig positive Distanzen zu verzeichnen. Die Größenordnung der M3C2-Distanzen beträgt dabei bis zu 5 mm. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass der Laserstrahl zum Teil von einem hinteren Bereich des Objektes reflektiert wird. Dies wird auch als Mixed-Pixel Effekt bezeichnet. Hieraus resultiert, dass die Distanz systematisch zu lang gemessen wird. Entscheidend hierfür ist die Größe

des Laserspots. Beim verwendeten Laserscanner Z+F IMAGER 5010 beträgt der Strahldurchmesser 3,5 mm@1m, siehe Z+F (2010). Dieser wächst aufgrund der angegebenen Strahldivergenz, dies $\sin d < 0.3$ mrad als Vollwinkel, bei längeren Distanzen an. Daraus resultiert für den gegebenen Messbereich von D = 4 - 7 m eine Spotgröße (Durchmesser) im Bereich von 5 - 6 mm. Für die Berechnung wird ein rechtwinkliger Auftreffwinkel am Objekt vorausgesetzt. Im Falle eines flacheren Auftreffwinkels, verändert sich der Laserspot zusätzlich. Er nimmt eine elliptische Form an, welche vom Auftreffwinkel abhängt. Dies führt zu einer weiteren Verstärkung des Mixed-Pixel Effektes. Die Punktabstände der Referenzmessung mit der Leica T-Scan werden mit 0,07 - 0.98 mm angegeben. Die Messfrequenz der einzelnen Zeilen beträgt max. 140 Linien pro Sekunde (Hexagon, 2013). Daraus resultiert, dass neben der höheren Genauigkeit eine deutlich detaillierte Objekterfassung (Auflösung) möglich ist. Die Punktabstände der hier vorliegenden Referenzpunktwolke, ist jedoch nicht konstant. Dies ist damit zu begründen, dass die Messung mit dem Leica T-Scan händisch erfolgte. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Punktdichte zum Teil deutlich unterhalb von 1 mm liegt. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass die Kantenbereiche zum Teil mehrfach erfasst wurden. Hieraus resultiert, dass die Kanten im Referenzdatensatz mit einer deutlich höheren Auflösung abgebildet werden als mit dem k-TLS-basierten MSS.

Im Falle der Scheuerleiste sind an den Randbereichen M3C2-Distanzen bis zu einer Größenordnung von -7 mm festzustellen, siehe Abbildung 6.12. Geometrisch ist dies so zu interpretieren, dass die Punkte der k-TLS-Messung vor den Referenzdaten liegen. Daraus ist abzuleiten, dass die Distanzmessung zu kurz erfolgt. Es wird vermutet, dass der Laserspot zum Teil auf die hervorstehenden Bereiche der Scheuerleiste trifft und von dort reflektiert wird. Dies führt zu einer verkürzten Distanz.



Abbildung 6.12: Separierter Bereich der M3C2-Distanzen der Scheuerleiste des Mockups in [mm].

6.5.2 Bewertung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Unsicherheitsmodellierung hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit bewertet. Im Wesentlichen werden hierfür die Resultate der Vorwärts- und Rückwärtsmodellierung miteinander verglichen. Aus der durchgeführten Vorwärtsmodellierung ist erkenntlich, dass eine k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung mit einer 3D-Gesamtunsicherheit von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm

möglich ist, vergleiche Abbildung 6.10. Wesentliche Voraussetzung hierfür bilden die Unsicherheiten der Einzelschritte, welche eine entsprechende Größenordnung nicht überschreiten dürfen. Im Falle der hier durchgeführten k-TLS Messung hat die Georeferenzierung den größten Anteil. Hierbei werden Werte mit bis zu 0,9 mm erreicht, siehe Abbildung 6.6. Hierbei ist festzuhalten, dass die Rotationen im Vergleich zu den Translationen einen größeren Einfluss haben. Die durchgeführten Genauigkeitsuntersuchungen der Georeferenzierungsmessung zwischen dem verwendeten Lasertracker Leica AT960-LR und der T-Probe zeigen, dass im Falle einer maximal möglichen Entfernung (20 m) bzw. bei einer Verdrehung von (45°) die Genauigkeit nicht zweifelsfrei eingehalten wird, vergleiche Abschnitt 6.2. Daher ist dies bei der Messplanung entsprechend mit zu berücksichtigen. Auch im Falle der Systemkalibrierung haben die Rotationen den größeren Einfluss, vergleiche hierzu die Abbildung 6.10. Bei der 3D-Objekterfassung mit dem Laserscanner ist ein Anstieg der Unsicherheiten mit zunehmender Distanz zu beobachten. Des Weiteren sind hier höhere Unsicherheiten an den Kanten der Bullaugen und an der Scheuerleiste zu verzeichnen, vergleiche Abbildung 6.8. Dies ist auf eine Zunahme der Unsicherheit in der Distanzmessung σ_D zurückzuführen, vergleiche Abbildung 6.9. Im Vergleich zum Umfeld ist ein Anstieg von 0,1 - 0,3 mm zu Verzeichnen. Der Grund hierfür ist eine verringerte Intensität, wodurch die Standardabweichung der Distanzmessung σ_D ansteigt. Insgesamt liegt die modelliert Unsicherheit der 3D-Objekterfassung mit dem Laserscanner unterhalb von 0,9 mm.



Abbildung 6.13: Histogramm der M3C2-Distanzen, die roten Linien visualisieren die vorgegebene Genauigkeit von ± 1 mm als beidseitigen Schwellwert.

Anhand der Ergebnisse aus der Rückwärtsmodellierung ist ebenfalls zu konstatieren, dass die zentrale Forderung einer 3D-Objekterfassung mit einer Genauigkeit von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm eingehalten wird. Dies ist dem Histogramm der berechneten M3C2-Distanzen in der Abbildung 6.13 zu entnehmen. Es ist festzuhalten, dass 97,22% der M3C2-Distanzen innerhalb der Spanne von ± 1 mm liegen. Der Mittelwert beträgt 0,2 mm und die einfache Standardabweichung 0,6 mm. In der Abbildung 5.13 sind die berechneten M3C2-Distanzen grafisch dargestellt. Wie in Abschnitt 6.5.1 erläutert, sind einige verbleibende Systematiken festzustellen. Hierzu gehören zum einen die streifenhaften Abweichungen, welches aus einer Pendelbewegung der mobilen Plattform resultiert. Dieser Effekt wird bei der durchgeführten Vorwärtsmodellierung nicht mit berücksichtigt. Im Sinne einer praktischen Umsetzung sollte dieser Umstand jedoch eher im Rahmen der Messung bzw. Prozessierung minimiert bzw. korrigiert werden. Möglichkeit welche hierfür in Frage kommen werden im Abschnitt 5.5 beschrieben.

Eine weitere Systematik, stellt der kurz im Abschnitt 6.5.1 erläuterte Mixed-Pixel Effekt an den Kanten dar. Hier erreichen die M3C2-Distanzen maximale Werte von ± 7 mm. Dies stellt im Vergleich zur Vorwärtsmodellierung ein deutlich höheren Betrag dar. Die hier ermittelten Werte erreichen lediglich 0,7 mm, was um das Zehnfache geringer ist. Hieraus ist abzuleiten, dass dieser Effekt entsprechend in der Modellierung mit aufzunehmen ist. Die Bestimmung dieser Systematiken stellt jedoch eine besondere Herausforderung dar. Zentrale Größen für die detailliertere Betrachtung sind die Größe des Laserspots und des Auftreffwinkels. Diese Thematik wird beispielsweise in Runne u. a. (2001) und Lichti u. a. (2005) aufgegriffen. Eine weiterer Ansatz ist eine Analyse der Energieverteilung des Laserspots. Hierfür wird auch der zeitliche Aspekt (Mittelung der Laser-basierten Distanzmessung) mit in Betracht gezogen, siehe Chaudhry u.a. (2019). Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass für diese Untersuchungen ein statisches Setup gewählt werden sollte. Eine externe Bewegung, wie beim k-TLS von mobilen Plattformen üblich, wird hierbei zu Problemen führen. Die unterschiedlichen Ansätze zeigen, dass diese Thematik ein weiterhin aktuelles Forschungsfeld abbildet. Eine allgemeingültige Vorgehensweise wird jedoch schwer möglich sein. Hierfür ist auch zu beachten, dass bei den Laserscannern unterschiedliche Arten der Distanzmessung (z. B. Impuls-, Phasendifferenzverfahren bzw. deren Mischung) zur Anwendung kommen. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Bedingungen und Voraussetzungen. Aufgrund der Komplexität wird auf eine weiterführende Analyse im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Bei Betrachtung der Größenordnung der M3C2-Distanzen stellt sich aus wissenschaftlicher Sicht die Forderung, dass diese Systematiken zukünftig bei der Vorwärtsmodellierung mit betrachtet werden sollten. Für die praktische Anwendung stellt sich jedoch immer die Frage, ob diese Bereiche von für die weitere Verwendung Relevanz sind. Da diese Bereiche bei einigen Anwendungen keine Rolle spielen, werden die auftretenden Mixed-Pixel selektiert und gelöscht. Ein Beispiel hierfür ist die Segmentierung von Objekten, siehe Che und Olsen (2018). Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass viele am Markt befindliche Softwareprodukte die Möglichkeit bieten Mixed-Pixel zu entfernen. Exemplarisch sei hier auf Leica (2022) und Z+F (2022a) verwiesen.

Bei Betrachtung der Abbildung 5.13 fällt auf, dass mit Ausnahme der beschriebenen systematischen Effekte augenscheinlich homogene Werte erreicht werden. Ein Anstieg der berechneten M3C2-Distanzen, welcher sich aus den Unsicherheiten der Rotationen in Verbindung mit einer wachsenden Entfernung zwischen Mockup und Laserscanner ergibt, ist nicht zu erkennen. Hieraus wäre zu schließen, dass der Einfluss der Rotationen doch geringer ausfällt, als im Rahmen der Vorwärtsmodellierung angenommen. Es ist aber anzumerken, dass der Einfluss der systematischen Abweichung aus der Pendelbewegung (streifenhaftes Muster) in der gewählten Darstellung der M3C2-Distanzen dominiert. In einigen Fällen werden hier Werte bis zu 1,5 mm erreicht. Ein Anstieg der Unsicherheiten zwischen der unteren linken und oberen rechten Ecke des Mockups, wie bei der Vorwärtsmodellierung ermittelt, wäre hierdurch überlagert. Der Abbildung 6.10 ist zu entnehmen, dass die Differenz zwischen unten links und oben rechts lediglich 0,3 - 0,4 mm beträgt. Des Weiteren ist festzuhalten, dass der Referenzdatensatz nicht die gesamte Fläche des Mockups abdeckt. Hier fehlt insbesondere die rechte obere Ecke, zu welcher die längsten Distanzen bei der k-TLS-basierten Objekterfassung auftreten. Um einen steigenden Einfluss, welcher aus längeren Distanzen in Verbindung mit den Unsicherheiten der Rotationen resultiert nachzuweisen, werden zwei Bereiche mit einer Ausdehnung von ca. $0.5 \ge 0.5$ m in der unteren linken und der oberen rechten Ecke selektiert. Die Bereichen sind in der Abbildung 6.14 dargestellt.

Für die beiden selektierten Bereiche werden jeweils die Mittelwerte gebildet. Diese betragen unten links 0,3 mm und oben rechts -0,1 mm. Die hieraus resultierende Differenz beträgt 0,4 mm. Dies entspricht der Größenordnung des Anstiegs, welcher im Rahmen der Vorwärtsmodellierung bestimmt wurde. Hieraus ist zu schlussfolgern, dass in den M3C2-Distanzen ein Anteil vorhanden ist, welcher auf die Unsicherheiten in den Rotationen zurückgeführt werden kann.



Abbildung 6.14: Separierte Bereiche (ca. 0,5 x 0,5 m) der M3C2-Distanzen in [mm], der unteren linken und oberen rechten Ecke.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Aktueller Stand und Problemstellung

Die 3D-Objekterfassung stellt eine der wesentlichsten Aufgaben in der Ingenieurgeodäsie und Industrievermessung dar. Als eine spezielle Aufgabe ist die Erfassung von industriell gefertigten Großstrukturen mit einer Ausdehnung von > 100 m zu sehen. Dies resultiert auch aus den besonderen Anforderungen, welche sich aus der industriellen Produktion ergeben. Zu nennen sind hier z. B. die Einflüsse welche aus den örtlichen Bedingungen resultieren. Dies können z.B. Vibrationen, Staub oder beengte Platzverhältnisse sein. Ein Beispiel aus der Wirtschaft ist der Bau von Megayachten, welche zum Teil eine Länge von bis zu 200 m erreichen können. Die Gestaltung der äußeren Bereiche erfolgt in einem sehr aufwendigen manuellen Spachtelprozes. Der 3D-Objekterfassung kommt dabei die zentrale Rolle der Qualitätssicherung zu. Hierauf aufbauend wird der Ist-Zustand mit den Soll-Daten aus der Konstruktion verglichen. Bei der Oberflächengestaltung liegt das Hauptaugenmerk auf der Ästhetik. Hierzu ergeben sich Vorgaben für die Ebenheit und die Einhaltung von vorgegebenen Krümmungsradien. Einen weiteren Aspekt stellen die Materialkosten dar. Um diese gering zu halten, ist eine sehr genaue und detaillierte Kenntnis der Oberflächen von wesentlicher Bedeutung. Aus diesen Vorgaben lässt sich ableiten, dass die 3D-Objekterfassung mit einer sehr hohen Genauigkeit erreicht werden sollte. Als Zielvorgabe in dieser Arbeit wird eine Genauigkeit von $\sigma_{3D} \leq 1 \text{ mm}$ (spezifiziert als Helmertscher 3D-Punktfehler) vorgegeben.

Auf Grund seiner hohen Effizienz hat sich das TLS als eine Art Standardverfahren bei der 3D-Objekterfassung etabliert. Eine besondere Form stellt das k-TLS dar. Dieses kommt insbesondere bei größeren und langgestreckten Objekten zur Anwendung. Konkrete Anwendungen hierfür gibt es einige, zu nennen sind beispielsweise die Erfassung von Straßenoberflächen und Bauwerken (Tunnel). Ein Vergleich des k-TLS bzgl. seiner Effizienz (Fläche pro Zeit) und Genauigkeit mit anderen Verfahren wird in der Abbildung 2.13 gegeben. In den letzten Jahren gab es beim k-TLS viele Entwicklungen. Die meisten Umsetzungen erfolgen in Form eines MSS. Generell können die verwendeten Sensoren in georeferenzierende und erfassende eingeteilt werden. Aufgrund der Verwendung mehrerer Sensoren ergeben sich wesentliche Teilschritte. Dies sind die 3D-Objekterfassung mit dem Laserscanner, die Synchronisierung und Systemkalibrierung zwischen den Sensoren sowie die Georeferenzierung der mobilen Plattform. Hieraus lässt sich eine höhere Komplexität beim k-TLS ableiten. Dies führt dazu, dass die Anforderungen steigen, um die hohen Genauigkeitsanforderungen einzuhalten. Hieraus lässt sich die Aufgabe dieser Dissertation formulieren. Ziel ist es eine k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung durchzuführen, bei welcher die hohe Genauigkeitsanforderung von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm eingehalten wird. Gleichzeitig soll eine effiziente Erfassung und Prozessierung der Daten gewährleistet sein. Einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung des Ziels liefert die Reduzierung der Messunsicherheiten der einzelnen Teilschritte. Die messtechnische Umsetzung und Datenprozessierung ist also entsprechend so zu gestalten, dass die Anforderungen erfüllt werden.

Umsetzung und Validierung

Das verwendete k-TLS-basierte MSS besteht aus einem Laserscanner, welcher auf einer mobilen Plattform montiert ist. Zur Anwendung kommen im Rahmen dieser Arbeit ein Rollwagen und ein Seilschlitten. Die Objekterfassung mit dem Laserscanner erfolgt im Profilmodus. Für die Synchronisierung wird bei jedem Nulldurchgang des Profils ein Triggersignal erzeugt und über ein Koaxialkabel an den Lasertracker übertragen. Nach Eingang führt dieser eine Georeferenzierungsmessung zu einer am Laserscanner montierten T-Probe aus. Hierdurch werden die 6 DoF (je drei Rotationen und Translationen) zwischen Lasertracker und T-Probe direkt bestimmt. Wesentliche Voraussetzungen für die Fusion der Daten von mehreren Sensoren sind die Synchronisierung und Systemkalibrierung. Die verwendete Kabel-basierte Synchronisierung weist sehr geringe Unsicherheiten auf. Die Gesamtverzögerung wird unter Annahme eines 30 m langen Kabels mit maximal 0,75 µs abgeschätzt. Im Falle der in dieser Arbeit auftretenden Plattformgeschwindigkeiten kann diese Abweichung vernachlässigt werden.

Bei der Systemkalibrierung werden die 6 DoF zwischen dem Laserscanner und der T-Probe bestimmt. Da die Auswirkung der Messunsicherheiten der Rotationen mit steigender Messentfernung zunimmt, sind speziell diese Unsicherheiten kritisch zu betrachten. Für die Bestimmung der 6 DoF wird ein RG-basierten Ansatz verwendet. Hierbei spielt die Anordnung der RG eine entscheidende Rolle. Daher werden die RG im Rahmen einer MCS optimiert. Als RG werden RE und Zylinder verwendet. Basierend auf der MCS wird jeweils eine optimierte Konstellation mit RE und Zylinder vorgestellt. Für die praktische Anwendung wird eine Kalibrierumgebung realisiert, welche aus elf RE besteht. In der Kalibrierumgebung werden Messungen durchgeführt. Zum Einsatz kommen dabei ein Z+F IMAGER 5010 und 5016. Die Bestimmung der 6 DoF erfolgt im Rahmen eines GHM. Die ermittelten Standardabweichungen betragen bei den Rotationen ca. 1 mgon und bei den Translationen 0,030 mm. Die verbleibenden Widersprüchen liegen im Mittel bei 0,4 mm, weißen jedoch verbleibenden Restsystematiken auf.

Die Georeferenzierung erfolgt direkt durch eine 6 DoF-Messung des Lasertrackers zu einer T-Probe. Die 6 DoF gelten jedoch nur für den ersten Punkt (Nulldurchgang) im Profil. Da dieses jedoch aus mehreren Punkten besteht, ist die Bewegung innerhalb eines Profils auf alle folgenden Punkte zu übertragen. Die Prädiktion erfolgt im Rahmen eines implementierten EKF. Um eine mögliche höhere Dynamik der Plattform zu berücksichtigen, werden neben den erfassten 6 DoF und den jeweiligen Geschwindigkeiten auch die Beschleunigungen in den Zustandsvektor aufgenommen. Aufgrund der möglichen unterschiedlichen Bewegungformen wird das physikalische Modell allgemein gehalten. Die Filterung der Punktwolke erfolgt vorwärts und rückwärts (Glättung).

Es werden je eine Messfahrt mit einem Rollwagen und einem Seilschlitten ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Übertragung der Zustandsänderungen auf alle Punkte im Profil essentiell ist, um die Genauigkeitsvorgaben zu erreichen. Dies zeigt sich in einer Rückwärtsmodellierung. Hierfür werden die k-TLS Punktwolken mit hochgenauen Referenzdaten, welche mit Hilfe einer Leica T-Scan aufgenommen wurden, verglichen. Zum großen Teil (97%) betragen die Unterschiede < 1 mm. Die Abweichungen > 1 mm sind größtenteils auf Störeinflüsse, wie stärkere Erschütterungen oder Pendelbewegungen der Plattform, zurückzuführen.

Die abschließende Bewertung der Qualität der k-TLS-basierten Objekterfassung erfolgt auf Basis der ermittelten Gesamtunsicherheit. Diese wird im Rahmen einer Vorwärtsmodellierung bestimmt. Die Implementierung erfolgt als MCS. Grundlage hierfür bildet zum einen die Unsicherheit der 3D-Objekterfassung mit dem Laserscanner. Zur Ermittlung der Standardabweichung der Distanzmessung wird ein Intensitäts-basiertes Modell verwendet. Des Weiteren werden die Unsicherheiten der Systemkalibrierung und der Georeferenzierung verwendet. In die Bestimmung der Unsicherheiten fließen die Herstellerangaben der Sensoren und weitere Annahmen ein. Zu nennen sind hier z. B das Systemrauschen beim EKF. Je nach Typ wird den Unsicherheiten eine WDF zugewiesen. Die Ergebnisse der Unsicherheitsmodellierung zeigen das eine Gesamtunsicherheit von < 1 mm möglich ist. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Messentfernung zwischen Laserscanner und Objekt einer der wesentlichen begrenzenden Faktoren ist. Bei den durchgeführten Messungen liegt diese im Bereich von 4 - 7 m. Zur Validierung der modellierten Unsicherheiten erfolgt ein Vergleich mit den Ergebnissen der Rückwärtsmodellierung, welche im Rahmen der Georeferenzierung durchgeführt wurde. Hierdurch können die Ergebnisse der Modellierung größtenteils bestätigt werden. Verbleibende Abweichungen sind auf systematischen Effekte (flacher Auftreffwinkel) und auf Störeinflüsse (Pendelbewegung) der mobilen Plattform zurückzuführen.

Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten Validierung zeigen, dass eine k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung mit einer Genauigkeit von $\sigma_{3D} \leq 1$ mm möglich ist. Es ist jedoch auch ersichtlich, wo noch Optimierungsbedarf besteht. Daher werden hier einige Verbessungsvorschläge zusammengestellt. Diese betreffen die messtechnische Komponenten sowie die mobile Plattform.

Zu nennen wäre beispielsweise der Plattformaufbau. Aus der sehr komplexen Produktionsumgebung resultiert, dass es vorteilhaft ist, unterschiedliche mobile Plattformen zu verwenden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden ein Rollwagen und ein Seilschlitten vorgestellt. Daraus folgt, dass ein Träger für die Sensoren verwendet werden sollte, welcher variabel auf unterschiedlichen mobilen Plattformen montiert werden kann. Eine mögliche Lösung zeigt die Abbildung 5.5. Darüber hinaus sollte die Plattform so gestaltet werden, dass eine gleichmäßige Bewegungsform ermöglicht wird. Hierzu gehören die Verwendung von zusätzlichen Dämpfungselementen und eines Antriebs. Auch wenn sich der Aufwand für die Trägerkonstruktion, Systemkalibrierung und Synchronisierung erhöht, ist die Verwendung von zusätzlicher Sensorik anzustreben. Zu nennen sind hier z. B. Neigungsmesser und IMU. Speziell letztere erreichen Messfrequenzen von einigen hundert Herz und ermöglichen eine explizite Bestimmung der Beschleunigungen. Dies könnte die Zuverlässigkeit und die Qualität der Georeferenzierungsmessung weiter verbessern. Darüber hinaus ist eine Verwendung eines reinen Profilscanners anzustreben. Aktuell am Markt verfügbare Laserscannermodelle erreichen eine maximale Drehgeschwindigkeit von 200 rps und mehr, vergleiche Tabelle 2.1. Durch die höhere Rotationsgeschwindigkeit kann in Verbindung mit der Synchronisierung die Frequenz bei der Georeferenzierungsmessung gesteigert werden. Die Zeitdauer bei der Profilmessung wird verkürzt, was sich im Falle von dynamischen Bewegungsformen positiv auswirkt.

Weitere Verbesserungen betreffen die Durchführung und Prozessierung. Bei der Systemkalibrierung sollte die Verwendung von Zylindern getestet werden. Die Simulation zeigt, dass auch Zylinder verwendet werden können. Hieraus ergeben sich für die Realisierung der Systemkalibrierung weitere Möglichkeiten. Denkbar ist beispielsweise eine Kombination aus RE und Zylindern. Des Weiteren sollten systematische Abweichungen im Rahmen der Auswertung betrachtet werden. Aus den Widersprüchen der Messungen ist erkenntlich, dass es verbleibende Systematiken bei der Laserscannermessung gibt. Ein Beispiel hierfür sind Abweichungen, welche durch intrinsische Parameter des Laserscanners verursacht werden, wie Distanzoffset oder Zielachsabweichung. Diese können zum einen im Rahmen einer Sensorkalibrierung bestimmt werden. Zum anderen ist eine Bestimmung im Rahmen der Systemkalibrierung möglich. Darüber hinaus stellt die Berücksichtigung von Korrelationen einen weiteren Aspekt dar. Es ist anzunehmen, dass es höhere Korrelationen gibt, als wie im Rahmen der erfolgten Modellierung berücksichtigt wurden. Dies gilt vor allem für Punkte innerhalb eines Laserscannerprofils. Da die Punktverteilung am Objekt beim k-TLS zum Teil ungleichmäßig ist, scheinen eher Zeit-basierte als räumliche Ansätze sinnvoll. Außerdem sind die ermittelten Unsicherheiten der 6 DoF-Messung des Lasertrackers zur T-Probe genauer zu untersuchen.

Bei den ermittelten Präzisionen ist keine klare Verteilungsform festzustellen. Für eine detailliertere Betrachtung wäre jedoch eine genauere Kenntnis des Messprozess bzw. der Prozessierung essentiell. Dies ergibt sich aus dem Zusammenhang, dass die Translationen und Rotationen nicht die originären Beobachtungen sind. Darüber hinaus sollten die Ergebnisse der eigenen Genauigkeitsuntersuchungen zwischen Lasertracker in einer detaillierteren Form in der Unsicherheitsmodellierung eingeführt werden. Für die Präzision und Genauigkeit wurden unterschiedliche Werte ermittelt. Dies gilt im Speziellen für längere Distanzen und größere Verdrehungen zwischen der T-Probe und dem Lasertracker. Eine Möglichkeit wäre hierfür diskrete Klassen zu definieren und diese entsprechend zu berücksichtigen. Wobei hier zu prüfen ist, ob gegebenenfalls Randeffekte auftreten.

Auch die Nutzung zusätzlicher Informationen aus dem Objektraum ist als Erweiterung denkbar. Hierdurch ergeben sich gleich mehrere Möglichkeiten. Zum einen könnte die Georeferenzierung verbessert werden. Speziell im Falle ruckartiger Bewegungen ist hiermit eine Verbesserung möglich. Des Weiteren wäre es denkbar die Systemkalibrierung simultan zur Objekterfassung durchzuführen. In beiden Fällen sind dann die entsprechenden funktionalen Ansätze entsprechend zu erweitern.

A Anhang

A.1 Kapitel 2

Qualitätsstufe Auflösung $Pixel(hz, v)/360^{\circ}$	gering	normal	hoch	premium
$1250 \; (48 \mathrm{mm}@10 \mathrm{m})$		0:22 min		
2500 (24 mm@10 m)	0:22 min	$0:45 \min$	1:31 min	
5000 (12 mm@10 m)	0:45 min	1:31 min	3:03 min	6:06 min
10000 (6mm@10m)	1:31 min	$3:03 \min$	$6:06 \min$	$12:13 \min$
20000 (3 mm@10 m)	$3:03 \min$	$6:06 \min$	12:13 min	24:26 min
40000 (1,5mm@10m)		12:13 min	24:26 min	48:57 min
80000 (0,8mm@10m)			48:57 min	122:22 min

 Tabelle A.1: Auflösungs und Qualitätsstufen, sowie die daraus resultierenden Zeiten eines Vollscans beim Z+F IMAGER 5016 (Z+F, 2018).

 Tabelle A.2: Auflösungsstufen und die daraus resultierenden Zeiten eines Vollscans mit dem Leica RTC360 [Scanner2Go].

Auflösung	Zeit Scan	Zeit Scan + HDR Foto
gering $(12mm@10m)$	0:30 min	1:30 min
mittel (6mm@10m)	0:50 min	1:50 min
hoch $(3mm@10m)$	1:51 min	2:51 min

A.2 Kapitel 4

 Tabelle A.3: Grenzen und Inkremente sowie daraus resultierende Anzahl an Möglichkeiten für die Optimierung der RE-Konstellation im Labor des GIH (Hartmann u. a., 2019).

Variable	Gre	enze	Inkromont	Möglichkeiten	
Variable	min.	max.	IIIKIGIIIGIII	Woglicikeiten	
y_1	$1 \mathrm{m}$	10 m	$0,5 \mathrm{~m}$	19	
z_1	$1 \mathrm{m}$	4 m	$0,5 \mathrm{~m}$	7	
α_1	20°	90°	5°	15	
β_1	0°	70°	5°	15	
γ_1	0°	70°	5°	15	
total				448875	

# RE	x [m]	y [m]	z [m]	$\alpha \; [^{\circ}]$	β [°]	$\gamma \; [^\circ]$
1	0.0	y_1	-0.8	90	0	$-\gamma_1$
2	0.0	y_1	-0.4	90	0	0
4	0.0	y_1	0.0	$-\alpha_1$	0	0
5	0.0	0.4	z_1	0	0	0
6	0.0	0.0	z_1	0	β_1	0
8	0.0	$-y_1$	0.0	α_1	0	0
10	0.0	$-y_1$	-0.4	90	0	0
11	0.0	$-y_1$	-0.8	90	0	γ_1
Laserscanner	0.0	0.0	0.0			

Tabelle A.4: Bereiche für die Anordnung und Orientierung der RE im Koordinatensystem des Laserscanners (s) (Hartmann u. a., 2019).

Fit	Durch-		Fitness-				
fkt.	lauf	y_1 [m]	$z_1 [m]$	$\alpha_1 [\circ]$	$\beta_1 [°]$	$\gamma_1 [^\circ]$	wert [mm]
f_1	1	1.0	4.0	60	70	70	0.03
	2	1.0	4.0	60	70	70	0.03
	3	1.0	4.0	60	70	70	0.03
f_2	1	8.0	2.5	20	70	70	0.57
	2	8.0	2.5	20	70	70	0.57
	3	8.5	2.5	20	70	70	0.58
f_3	1	8.0	2.5	20	70	70	0.57
	2	8.0	2.5	20	70	70	0.57
	3	8.0	2.5	20	70	70	0.57
	4	8.0	2.5	20	70	70	0.57
	5	8.0	2.5	25	70	70	0.58
	6	6.5	2.5	25	65	65	0.60
	7	8.0	2.5	20	70	70	0.57

20

20

20

70

70

70

70

70

70

0.57

0.57

0.57

8

9

10

8.0

8.0

8.0

2.5

2.5

2.5

 Tabelle A.5: Ergebnisse der kombinierten Optimierung aus Hartmann u. a. (2019).

A.3 Kapitel 5

Rollwagen



Abbildung A.1: Ergebnisse des Zustandsvektors der iEKF-Prozessierung (vorwärts) - Rollwagen.



Abbildung A.2: Ergebnisse des Zustandsvektors der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Rollwagen.



Abbildung A.3: Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts) - Rollwagen



Abbildung A.4: Verteilung der Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts) - Rollwagen.



Abbildung A.5: Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Rollwagen.



Abbildung A.6: Verteilung der Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Rollwagen.

Seilschlitten



Abbildung A.7: Ergebnisse des Zustandsvektors der iEKF-Prozessierung (vorwärts) - Seilschlitten.



Abbildung A.8: Ergebnisse des Zustandsvektors der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Seilschlitten.



Abbildung A.9: Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts) - Seilschlitten.



Abbildung A.10: Verteilung der Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts) - Seilschlitten.



Abbildung A.11: Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Seilschlitten.



Abbildung A.12: Verteilung der Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Seilschlitten.

A.4 Kapitel 6

Stationierung Lasertracker

Punkt	$X_l \; [mm]$	$Y_l \; [mm]$	$Z_l [\mathrm{mm}]$	$s_{X_l} [\mathrm{mm}]$	$s_{Y_l} [\mathrm{mm}]$	s_{Z_l} [mm]
311	$2359,\!7960$	-1075,6636	$133,\!1779$	0,0011	0,0023	0,0022
522	$2945,\!1670$	$-4839,\!4358$	$3173,\!3956$	0,0028	0,0036	0,0071
432	1808,7331	$-6291,\!6109$	$187,\!4354$	0,0216	0,0062	0,0128
111	$-5630,\!8846$	-1838,5721	-1304,7184	0,0012	0,0025	0,0041
302	-83,0009	$997,\!2082$	$1160,\!9929$	0,0016	0,0031	0,0027
532	$-4252,\!6321$	$-3765,\!6266$	$216,\!2388$	0,0035	0,0039	0,0070

Tabelle A.6: Stationierungsmessung im 3D Labor des GIH - Koordinaten im Lasertrackersystem l

 Tabelle A.7: Stationierungsmessung im 3D Labor des GIH - Koordinaten im Referenzsystem r

Punkt	$X_r \; [\mathrm{mm}]$	$Y_r [\mathrm{mm}]$	$Z_r [\mathrm{mm}]$	s_{X_r} [mm]	$s_{Y_r} \; [\mathrm{mm}]$	s_{Z_r} [mm]
311	16327,019	12942,467	1547,878	0,021	0,023	0,023
522	9994,204	$14571,\!239$	4513,361	0,035	0,036	0,041
432	11982,208	10003,848	1545,028	0,026	0,024	0,029
111	10613,860	18564,844	48,065	0,048	$0,\!053$	$0,\!057$
302	16326,284	16144,771	2580,228	0,018	0,019	0,023
532	10009,308	$16267,\!158$	$1558,\!556$	0,043	$0,\!054$	$0,\!054$

Überprüfung der Genauigkeit der Lasertracker zu T-Probe Messung

Std.pkt.nr.	$\hat{\sigma}_0$ [-]	$\hat{\sigma}_{t_X}$ [mm]	$\hat{\sigma}_{t_Y}$ [mm]	$\hat{\sigma}_{t_Z}$ [mm]	$\hat{\sigma}_{\omega}$ [gon]	$\hat{\sigma}_{\varphi}$ [gon]	$\hat{\sigma}_{\kappa}$ [gon]
52	0.38	0.0036	0.0036	0.0038	0.0000	0.0001	0.0000
54	0.90	0.0090	0.0092	0.0095	0.0001	0.0001	0.0001
104	0.81	0.0107	0.0107	0.0107	0.0001	0.0001	0.0001
103	0.70	0.0092	0.0093	0.0094	0.0001	0.0001	0.0000
102	1.29	0.0163	0.0170	0.0176	0.0002	0.0001	0.0001
101	1.13	0.0132	0.0131	0.0147	0.0001	0.0001	0.0001
151	1.33	0.0176	0.0183	0.0219	0.0002	0.0001	0.0001
152	1.48	0.0199	0.0217	0.0243	0.0001	0.0002	0.0001
153	0.81	0.0125	0.0123	0.0127	0.0001	0.0001	0.0001
154	0.70	0.0093	0.0093	0.0095	0.0001	0.0001	0.0000
155	1.08	0.0152	0.0146	0.0159	0.0001	0.0001	0.0001
205	0.82	0.0137	0.0126	0.0151	0.0001	0.0001	0.0001
204	1.02	0.0152	0.0154	0.0166	0.0001	0.0001	0.0001
203	0.98	0.0151	0.0160	0.0173	0.0001	0.0001	0.0001
202	0.80	0.0117	0.0136	0.0150	0.0001	0.0001	0.0001
201	1.24	0.0197	0.0222	0.0275	0.0002	0.0001	0.0001

Tabelle A.8: Übersicht über die Unsicherheiten der geschätzten Transformationsparameter des jeweiligen Standpunktes zum Standpunkt 51 (Ehrhorn, 2019).

Tabelle A.9: Signifikanztest ($\alpha = 5\%$) der 6 DoF-Messungen auf Normalverteilung, in Rot: Messelemente, die signifikant von der Normalverteilung abweichen (Ehrhorn, 2019).

Standpunktnummer	t_X	t_Y	t_Z	r_X	r_Y	r_Z
51	X	X	Х	Х	Х	Х
52	Х	Х		Х	Х	Х
54	X	Х	Х	Х	Х	X
104	Х	Х	Х	Х	Х	Х
103		Х	Х	Х		Х
102	Х	Χ	Х	Х	Х	Х
101	Х	Х	Χ	Х	Х	Х
151	Х	Х	Х	Х	Х	Х
152	Х	Х	Х		Х	Х
153	Х	Х	Х	Х	Х	Х
154		Х	Х	Х	Х	Х
155	Х	Х		Х	Х	
205	Х	Х	Х	Х	Х	
204		Х	Х	Х	Х	Х
203	X	X	Х	Х	Х	Χ
202	Х	Х	Х	Х	Х	Х
201	Х	Х	Х	Х	Х	Х

	keine Verdrehung \rightarrow maximale Verdrehung							
Entfernung [m]	Präzision von t_X in [mm]							
5	0.004	0.004 0.065 - 0.010 -						
10	0.023	0.025	0.010	0.011	-			
15	0.012	0.021	0.014	0.012	0.007			
20	0.040	0.033	0.026	0.005	0.014			

Tabelle A.10: Präzision der Translation in X, in Rot die Präzisionen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) größer sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019).

Tabelle A.11: Präzision der Translation in Y, in Rot die Präzisionen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) größer sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019).

	keine Verdrehung \rightarrow maximale Verdrehung						
Entfernung [m]	Präzision von t_Y in [mm]						
5	0.008	0.008 0.041 - 0.005 -					
10	0.017	0.027	0.021	0.010	-		
15	0.017	0.034	0.021	0.017	0.012		
20	0.024	0.046	0.016	0.014	0.012		

Tabelle A.12: Präzision der Translation in Z, in Rot die Präzisionen, die signifikant größer ($\alpha = 5\%$) sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019)

	keine Verdrehung \rightarrow maximale Verdrehung							
Entfernung [m]	Präzision von t_Z in [mm]							
5	0.004	0.004 0.020 - 0.002 -						
10	0.010	0.013	0.010	0.013	-			
15	0.013	0.020	0.013	0.009	0.003			
20	0.033	0.017	0.017	0.006	0.003			

Tabelle A.13: Präzision der Rotation in X, in Rot die Präzisionen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) größer sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019)

	keine Verdrehung \rightarrow maximale Verdrehung							
Entfernung [m]	Präzision von r_X in $[\circ]$							
5	0.0011	0.0011 0.0127 - 0.0011						
10	0.0026	0.0048	0.0029	0.0018	-			
15	0.0022	0.0061	0.0031	0.0020	0.0012			
20	0.0079	0.0092	0.0032	0.0027	0.0024			

Tabelle A.14: Präzision der Rotation in Y, in Rot die Präzisionen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) größer sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019).

	keine Verdrehung \rightarrow maximale Verdrehung								
Entfernung [m]	Präzision von r_Y in [°]								
5	0.0014	0.0014 0.0064 - 0.0019 -							
10	0.0036	0.0025	0.0016	0.0015	-				
15	0.0023	0.0034	0.0023	0.0025	0.0019				
20	0.0033	0.0027	0.0031	0.0007	0.0019				

	keine Verdrehung \rightarrow maximale Verdrehung							
Entfernung [m]		Präzision von r_Z in [°]						
5	0.0007	0.0007 0.0075 - 0.0017 -						
10	0.0023	0.0030	0.0023	0.0013	-			
15	0.0020	0.0027	0.0015	0.0012	0.0013			
20	0.0059	0.0052	0.0015	0.0014	0.0007			

Tabelle A.15: Präzision der Rotation in Z, in Rot die Präzisionen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) größer sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019).

Tabelle A.16: Richtigkeit der Translation, in Rot die Abweichungen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) größersind als 0

	keine Verdrehung \rightarrow maximale Verdrehung							
Entfernung [m]	Richtigkeit der Translation in [mm]							
5	-	- 0.046 - 0.077 -						
10	0.100	0.094	0.122	0.111	-			
15	0.115	0.149	0.151	0.111	0.167			
20	0.187	0.131	0.193	0.141	0.229			

Tabelle A.17: Richtigkeit der Rotation für die Punkte [3000,0,0]; [0,3000,0]; [0,0,3000], in Rot die Abweichungen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) größer sind als 0 (Ehrhorn, 2019).

	keine Verdrehung \rightarrow maximale Verdrehung						
Entfernung [m]	Richtigkeit der Trans. u. Rot. in [mm]						
Für den Punkt [3000,0,0]							
5	-	- 0.171 - 0.702 -					
10	0.302	0.351	0.586	0.734	-		
15	0.207	0.541	0.652	0.518	0.575		
20	0.310	0.617	0.631	0.532	2.012		
Für den Punkt [0,3000,0]							
5	-	0.186	-	0.583	-		
10	0.702	0.889	0.763	0.831	-		
15	0.801	1.264	1.154	0.999	1.047		
20	1.168	0.942	0.965	1.168	1.854		
	Für de	en Punk	t [0,0,30	[000]			
5	- 0.147 - 0.627 -						
10	0.834	0.932	0.836	1.039	-		
15	0.906	1.372	1.268	1.020	1.147		
20	1.365	0.965	0.971	1.206	2.019		

Literaturverzeichnis

- [3D Mapping Solutions 2022] 3D MAPPING SOLUTIONS ; 3D MAPPING SOLUTIONS GMBH (Hrsg.): Mobiles Straßenerfassungssystem (MoSES): Kinematische Vermessung von Tunnel. 2022. – URL https://www.3d-mapping.de/dienstleistungen/tunnelvermessung/. – Zugriffsdatum: 07.01.2022
- [Alkhatib u. a. 2009] ALKHATIB, H.; NEUMANN, I.; KUTTERER, H.: Uncertainty modeling of random and systematic errors by means of Monte Carlo and fuzzy techniques. In: *Journal of Applied Geodesy* 3 (2009), Nr. 2, S. 67–79
- [Alkhatib und Kutterer 2013] ALKHATIB, Hamza ; KUTTERER, Hansjörg: Estimation of Measurement Uncertainty of kinematic TLS Observation Process by means of Monte-Carlo Methods. In: Journal of Applied Geodesy 7 (2013), Nr. 2, S. 125–134. – URL https://doi.org/10.1515/JAG.2009.008. – Zugriffsdatum: 30.09.2021
- [AllTerra 2019] ALLTERRA ; ALLTERRA (Hrsg.): Trimble Indoor Mobile Mapping Solution (TIMMS) - Datenblatt. 2019. - URL https://www.applanix.com/downloads/products/ specs/TIMMS_Datasheet_DE_A4.pdf
- [AXIOS 3D 2021] AXIOS 3D; AXIOS 3D® SERVICES GMBH (Hrsg.): CamBar/SingleCam
 Produktbeschreibung, technische Daten. 2021. URL https://axios3d.de/optische-m
 esssysteme/. Zugriffsdatum: 17.05.2021
- [Balch 2003] BALCH, M.: Complete digital design: A comprehensive guide to digital electronics and computer system architecture. New York : McGraw-Hill, 2003. – ISBN 0071409270
- [Bar-Shalom u. a. 2007] BAR-SHALOM, Y.; LI, X.-R.; KIRUBARAJAN, T.: Estimation with applications to tracking and navigation: Theory, algorithms and software. [Nachdr.]. New York, NY: Wiley, 2007 (A Wiley-Interscience publication). – ISBN 0-471-41655-X
- [Basis Software, Inc. 2017] BASIS SOFTWARE, INC.; BASIS SOFTWARE, INC. (Hrsg.): Surphaser® 400, data sheet. 2017. – URL http://www.surphaser.com/pdf/Surphaser%20400.pdf. – Zugriffsdatum: 19.04.2021
- [Besl und McKay 1992] BESL, Paul J.; MCKAY, Neil D.: A Method for Registration of 3-D Shapes. In: IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 14 (1992), S. 239–256
- [Bianco u. a. 2018] BIANCO, S.; CIOCCA, G.; MARELLI, D.: Evaluating the Performance of Structure from Motion Pipelines. In: *Journal of Imaging* 4 (2018), Nr. 8
- [Boersch 2007] BOERSCH, I.: Wissensverarbeitung: : Eine Einführung in die künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure. 2. Auflage. München : ELSEVIER Spektrum Akademischer Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8274-1844-9
- [Böhm und Becker 2007] BÖHM, J. ; BECKER, S.: Automatic Marker-Free Registration of Terrestrial Laser Scans using Reflectance Features. In: Optical 3-D measurement techniques. Zurich : Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, 2007, S. 338–344. – ISBN 3-906467-67-8

- [Bösemann 2017] BÖSEMANN, W.: Industrial photogrammetry for applications in automotive and aerospace industry. In: INSTITUT FOR PHOTOGRAMMETRY, UNIVERSITY STUTTGART (Hrsg.): 56th Photogrammetric Week 2017, Institute for Photogrammetry of the University of Stuttgart, 2017 (Photogrammetric Week). – URL https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/2017/PDF/ 18-Boesemann-Presentation.pdf. – Zugriffsdatum: 16.12.2021
- [Boston Dynamics 2021] BOSTON DYNAMICS: Spot® Webseite: Automate sensing and inspection, capture limitless data, and explore without boundaries. 2021. - URL https://www. bostondynamics.com/products/spot
- [Brazeal 2013] BRAZEAL, Ryan: Geometric form fitting of point cloud data representing spherical registration/georeferencing targets. (2013)
- [Bucy und Joseph 1968] BUCY, R. S.; JOSEPH, P. D.: Filtering for stochastic processes with applications to guidance. Interscience Publishers New York, 1968. 195 S. ISBN 0470116528
- [Bureick 2008] BUREICK, J.: Visualisierung von Genauigkeitsinformationen in 3D-Punktwolken. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Bachelorarbeit (unveröffentlicht), 2008
- [Bureick u. a. 2019] BUREICK, J.; VOGEL, S.; NEUMANN, I.; UNGER, J.; ALKHATIB, H.: Georeferencing of an Unmanned Aerial System by Means of an Iterated Extended Kalman Filter Using a 3D City Model. In: PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science 87 (2019), Nr. 5-6, S. 229–247. – ISSN 2512-2789
- [Cefalu u. a. 2017] CEFALU, A. ; HAALA, N. ; SCHMOHL, S. ; NEUMANN, I. ; GENZ, T.: A mobile multi-sensor platform for building reconstruction integrating terrestrial and autonomous UAVbased close range data acquisition. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W6 (2017), S. 63–70
- [Chaudhry u. a. 2019] CHAUDHRY, S. ; SALIDO-MONZÚ, D. ; WIESER, A.: Simulation of 3D laser scanning with phase-based EDM for the prediction of systematic deviations. In: BODERMANN, B. (Hrsg.) ; FRENNER, K. (Hrsg.) ; SILVER, R. M. (Hrsg.): Modeling Aspects in Optical Metrology VII, SPIE, 2019, S. 13. ISBN 978-1-5106-2793-2
- [Che und Olsen 2018] CHE, E. ; OLSEN, M. J.: Multi-scan segmentation of terrestrial laser scanning data based on normal variation analysis. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 143 (2018), S. 233–248. – ISSN 09242716
- [Creaform 2021] CREAFORM ; CREAFORM (Hrsg.): Maxshot 3D Produktbeschreibung, technische Daten. 2021. – URL https://www.creaform3d.com/de/messtechnik/ das-optische-koordinatenmesssystem-maxshot-3d. – Zugriffsdatum: 17.05.2021
- [Date u. a. 2019] DATE, H. ; WAKISAKA, E. ; MORIBE, Y. ; KANAI, S.: TLS point cloud registration based on ICP algorithm using point quality. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W13 (2019), S. 963– 968
- [Dennig u. a. 2017] DENNIG, D.; BUREICK, J.; LINK, J.; DIENER, D.; HESSE, C.; NEUMANN, I.: Comprehensive and Highly Accurate Measurements of Crane Runways, Profiles and Fastenings. In: Sensors 17 (2017), Nr. 5. – ISSN 1424-8220
- [DIN 1319-2:2005-10 2005] : Grundlagen der Messtechnik Teil 2: Begriffe für Messmittel. 2005.
 URL https://www.beuth.de/de/norm/din-1319-2/81716151. Zugriffsdatum: 09.08.2022
- [DIN 1319-3:1996-05 1996] : Grundlagen der Meßtechnik Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße Meßunsicherheit. 1996. – URL https://www.beuth.de/de/norm /din-1319-3/2742975. – Zugriffsdatum: 17.04.2022
- [DIN EN ISO 9000:2015-11 2015] : Qualitätsmanagementsysteme Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015). 2015. URL https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-9000/235671064. Zugriffsdatum: 09.08.2022
- [Dorndorf 2014] DORNDORF, A.: Prozessoptimierung von TLS-basierten kinematischen Mapping-Systemen. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Masterarbeit (unveröffentlicht), 2014
- [Dorndorf u. a. 2015] DORNDORF, A.; HARTMANN, J.; PAFFENHOLZ, J.-A.; NEUMANN, I.; HESSE, C.: Validierung und Kalibrierung eines TLS-basierten Multi-Sensor-Systems. In: LUHMANN, T. (Hrsg.); MÜLLER, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik.* Berlin and Offenbach : Wichmann, 2015, S. 85–97. ISBN 978-3-8790-7553-9
- [Dreier u. a. 2021] DREIER, A. ; JANSSEN, J. ; KUHLMANN, H. ; KLINGBEIL, L.: Quality Analysis of Direct Georeferencing in Aspects of Absolute Accuracy and Precision for a UAV-Based Laser Scanning System. In: *Remote Sensing* 13 (2021), Nr. 18. – ISSN 2072-4292
- [Drixler 1993] DRIXLER, E.: Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum. München : Deutsche Geodätische Kommission (DGK), 1993 (Dissertation, Reihe C, Nr. 409). – ISBN 3 7696 9454 6
- [Duwe-3d AG 2014] DUWE-3D AG ; DUWE-3D AG (Hrsg.): Vom Scannen und Registrieren-Mehr Präzision. 2014. – URL https://www.duwe-3d.de/mediathek/pdf/anwenderberichte/ anwendungsbeispiel%20FHWS-API. – Zugriffsdatum: 20.12.2021
- [Ehm und Hesse 2012] EHM, M.; HESSE, C.: Entwicklung eines kinematischen Laserscansystems für Anwendungen im Schiffbau. In: FRAUNHOFER IGD (Hrsg.): Go-3D 2012 Computergraphik für die Praxis Bd. 2012, Fraunhofer Verlag, 2012, S. 31–36. – ISBN 978-3-8396-0427-4
- [Ehrhorn 2019] EHRHORN, A.: Unsicherheitsmodellierung eines k-TLS basierten Multi-Sensor-Systems. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Masterarbeit (unveröffentlicht), 2019
- [Elseberg u. a. 2013] ELSEBERG, J. ; BORRMANN, D. ; NÜCHTER, A.: Algorithmic Solutions for Computing Precise Maximum Likelihood 3D Point Clouds from Mobile Laser Scanning Platforms. In: *Remote Sensing* 5 (2013), Nr. 11, S. 5871–5906. – ISSN 2072-4292
- [Ernst u. a. 2022] ERNST, D. ; VOGEL, S. ; ALKHATIB, H. ; NEUMANN, I.: Intrinsische und extrinsische Kalibrierung eines Velodyne VLP-16. In: LUHMANN, T. (Hrsg.) ; MÜLLER, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik*. Berlin : Wichmann, H and Wichmann Verlag, 2022, S. 186–193. – ISBN 978-3-87907-726-7
- [Faro 2021] FARO ; FARO (Hrsg.): FARO Trek 3D Laser Scanning Integration: Ermöglicht autonomes Scannen mit dem mobilen Roboter Spot von Boston Dynamics. 2021. – URL https: //www.faro.com/de-DE/Products/Hardware/Trek-3D-Laser-Scanning-Integration. – Zugriffsdatum: 20.12.2021
- [Filin 2001] FILIN, S.: Calibration of airborne and spaceborne laser altimeters using natural surfaces, Ohio State University, Dissertation, 2001
- [Fraunhofer IPM 2019] FRAUNHOFER IPM ; FRAUNHOFER IPM (Hrsg.): Urban Mapping System MUM. 2019. – URL https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/en/PDFs/ product-information/OF/MTS/mobile-urban-mapping-system-MUM.pdf
- [Geist 2017] GEIST, M.: Flächenhafte Formabweichungen bei der Anwendung terrestrischer Laserscanner. München : Deutsche Geodätische Kommission (DGK), 2017 (Dissertation, Reihe C, Nr. 806)

- [GeoSLAM 2022] GEOSLAM ; GEOSLAM (Hrsg.): ZEB GO. 2022. URL https://geoslam .com/solutions/zeb-go/. – Zugriffsdatum: 04.01.2022
- [Gierschner u. a. 2021] GIERSCHNER, F. ; KENNEWEG, R. ; AMBROSAT, T. ; BÖSS, V. ; GEIST, M. ; HARTMANN, J. ; FLÜGGE, W. ; DENKENA, B.: Automatisierte Modellierung als Beitrag für die Quali-tätssicherung in der industriellen Produktion. In: Allgemeine vermessungs-nachrichten (AVN) 128 (2021), Nr. 4, S. 192–202. – ISSN 00025968
- [Glennie 2007] GLENNIE, C.: Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. In: Journal of Applied Geodesy 1 (2007), Nr. 3, S. 147–157. – ISSN 1862-9024
- [Glennie 2012] GLENNIE, C.: Calibration and Kinematic Analysis of the Velodyne HDL-64E S2
 Lidar Sensor. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 78 (2012), Nr. 4, S. 339–347.
 ISSN 00991112
- [Goldberg 1989] GOLDBERG, D. E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. 1st. USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, 1989. – ISBN 0201157675
- [GOM 2021] GOM ; GOM (Hrsg.): PONTOS Live Optische 3D-Messtechnik zum Tracken und Tasten. 2021. – URL https://www.gom.com/de-de/produkte/hochpraezise-3d-m esstechnik/pontos-live. – Zugriffsdatum: 17.05.2021
- [GOM 2022] GOM; GOM (Hrsg.): ATOS 5X: Automatisiertes 3D-Scannen mit großen Messfeldern. 2022. – URL https://www.gom.com/de-de/produkte/hochpraezise-3d-messtechnik/ atos-5/atos-5x. – Zugriffsdatum: 04.02.2022
- [Gordon 2008] GORDON, B.: Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2008
- [Gottwald u. a. 2008] GOTTWALD, R. ; HEISTER, H. ; STAIGER, R.: Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern eine Standortbestimmung. In: DVW (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning* Bd. 54. Augsburg : Wißner, 2008, S. 91–110. ISBN 9783896396563
- [Gräfe 2008] GRÄFE, G.: Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum. Neubiberg, Univ. der Bundeswehr München, Fak. für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Studiengang Geodäsie und Geoinformationen, Dissertation, 2008. – 170 S
- [GSI 2021] GSI ; GEODETIC SYSTEMS (Hrsg.): V-STARS Technical Reports, Papers and Brochures. 2021. – URL https://www.geodetic.com/v-stars/papers/. – Zugriffsdatum: 17.05.2021
- [Harmening u. a. 2016] HARMENING, C. ; KAUKER, S. ; NEUNER, H. ; SCHWIEGER, V.: Terrestrial Laserscanning - Modeling of Correlations and Surface Deformations. In: *FIG working week 2016*, *Christchurch, New Zealand, 2-6 May 2016.* FIG, 2016. – ISBN 978-87-92853-52-3
- [Hartmann u. a. 2021] HARTMANN, J.; BACHMANN, A.; URBAN, B.; HESSE, C.; GIERSCHNER, F.; NEUMANN, I.: Hochgenaues kinematisches Laserscanning als Beitrag für die Qualitätssicherung in der industriellen Produktion. In: Allgemeine vermessungs-nachrichten (AVN) 128 (2021), Nr. 4, S. 180–188. – ISSN 00025968
- [Hartmann u. a. 2019] HARTMANN, J.; GÖSSELN, I. von; SCHILD, N.; DORNDORF, A.; PAF-FENHOLZ, J.-A.; NEUMANN, I.: Optimisation of the Calibration Process of a k-TLS based Multi-Sensor-System by Genetic Algorithms. In: *ISPRS - International Archives of the Photo*grammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W13 (2019), S. 1655–1662

- [Hartmann und Hartmann 2022] HARTMANN, J. ; HARTMANN, J.: Unsicherheiten beim TLS Aspekte der Modellierung. In: DVW (Hrsg.): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022. Augsburg : Wißner-Verlag, 2022 (Schriftenreihe des DVW), S. 187–203. – ISBN 978-3-95786-314-0
- [Hartmann u.a. 2018a] HARTMANN, J.; KENNEWEG, R.; GIERSCHNER, F.; HESSE, C.; GEIST, M.; DITTRICH M.-A.; BÖSS, V.; NEUMANN, I.: Optimierung des Materialauftrags an Megayachten. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV) (2018), Nr. 6/2018, S. 384–389
- [Hartmann u. a. 2017] HARTMANN, J.; PAFFENHOLZ, J.-A.; STRÜBING, T.; NEUMANN, I.: Determination of Position and Orientation of LiDAR Sensors on Multisensor Platforms. In: Journal of Surveying Engineering 143 (2017), Nr. 4, S. 04017012. – ISSN 0733-9453
- [Hartmann u. a. 2018b] HARTMANN, J.; TRUSHEIM, P.; ALKHATIB, H.; PAFFENHOLZ, J.-A.; DIENER, D.; NEUMANN, I.: High Accurate Pointwise (Geo-)Referencing of a k-TLS based Multi-Sensor-System. In: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-4 (2018), S. 81–88
- [Heikkilä u. a. 2010] HEIKKILÄ, R. ; KIVIMÄKI, T. ; MIKKONEN, M. ; LASKY, TY A.: Stop & Go Scanning for Highways - 3D Calibration Method for a Mobile Laser Scanning System. In: BRNO, Tribun (Hrsg.): Proceedings – The 27th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2010 (Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)), S. 40–48
- [Heinz 2021] HEINZ, E.: Beiträge zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning. Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Dissertation, 2021
- [Heinz u. a. 2015] HEINZ, E. ; ELING, C. ; WIELAND, M. ; KLINGBEIL, L. ; KUHLMANN, H.: Development, Calibration and Evaluation of a Portable and Direct Georeferenced Laser Scanning System for Kinematic 3D Mapping. In: *Journal of Applied Geodesy* 9 (2015), Nr. 4. – ISSN 18629016
- [Heinz u. a. 2016] HEINZ, E. ; ELING, C. ; WIELAND, M. ; KLINGBEIL, L. ; KUHLMANN, H.: Development of a Portable Mobile Laser Scanning System with Special Focus on the System Calibration and Evaluation. In: 5th International Conference on Machine Control and Guidance, 2016
- [Heinz u. a. 2017] HEINZ, E. ; ELING, C. ; WIELAND, M. ; KLINGBEIL, L. ; KUHLMANN, H.: Analysis of Different Reference Plane Setups for the Calibration of a Mobile Laser Scanning System. In: LIENHART, W. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 17*. Berlin, Offenbach : Wichmann Verlag, 2017, S. 131–146
- [Heinz u. a. 2020] HEINZ, E. ; HOLST, C. ; KUHLMANN, H. ; KLINGBEIL, L.: Design and Evaluation of a Permanently Installed Plane-Based Calibration Field for Mobile Laser Scanning Systems. In: *Remote Sensing* 12 (2020), Nr. 3, S. 555. – ISSN 2072-4292
- [Heister 2006] HEISTER, H.: Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). In: DVW (Hrsg.): Terrestrisches Laser-Scanning Bd. 51. Augsburg : Wißner-Verl., 2006, S. 35–44. – ISBN 978-3-89639-555-9
- [Heister u. a. 1995] HEISTER, H.; CASPARY, W.; HOCK, C.; KLEMM, J.; STERNBERG, H.: KiSS a Hybrid Measuring System for kinematic Surveying. In: LINKWITZ, Klaus (Hrsg.); HANGLEITNER

(Hrsg.): High Precision Navigation 95 : proceedings of the 3rd International Workshop on High Precision Navigation ; University of Stuttgart, April 1995 Bd. 7843. Bonn : Dümmler, 1995, S. 561–568. – ISBN 3-427-78431-2

- [Held u. a. 2017] HELD, C. ; FRÖHLICH, C. ; METTENLEITER, M. ; PRITTCHARD, D. ; RÜTHER, H. ; WICKENDEN, C.: New Workflows for the TLS Documentation of Cultural Heritage Sites on the Example of Worldwide Projects. In: PAFFENHOLZ, Jens-André (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017)*. Augsburg : Wißner, 2017 (Schriftenreihe des DVW), S. 131– 143. – ISBN 978-3-95786-145-0
- [Hennes 2007] HENNES, M.: Konkurrierende Genauigkeitsmaße Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. In: Allgemeine vermessungs-nachrichten (AVN) (2007), Nr. 04, S. 136– 146. – URL file:///C:/Users/W86-9NN/Downloads/136_46_hennes.pdf. – Zugriffsdatum: 09.08.2022. – ISSN 00025968
- [Hennes 2014] HENNES, M.: Zur raumzeitlichen Datenerfassung. In: NEUNER, H. (Hrsg.): Zeitabhängige Messgrößen – ihre Daten haben (Mehr-)Wert. Augsburg : Wißner, 2014 (Beiträge zum ... DVW-Seminar), S. 17–34. – ISBN 9783896399700
- [Hennes u. a. 2014] HENNES, M.; URBAN, S.; WURSTHORN, S.: Zur Synchronisierung von Multi-Sensor-Systemen Grundlagen und Realisierungen. In: STERNBERG, H. (Hrsg.): *Multi-Sensor-Systeme bewegte Zukunftsfelder*. Augsburg : Wißner, 2014 (Beiträge zum 138. DVW-Seminar).
 ISBN 978-3-89639-995-3
- [Hesse 2007] HESSE, C.: Ein Beitrag zur hochauflösenden kinematischen Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., Nr. 268, 2008. München : Deutsche Geodätische Kommission (DGK), 2007 (Dissertation, Reihe C, Nr. 608). – ISBN 3 7696 5047 6
- [Heunecke u. a. 2013] HEUNECKE, O. ; KUHLMANN, H. ; WELSCH, W. ; EICHHORN, H.-B. ; MÖSER, M. (Hrsg.) ; MÜLLER, G. (Hrsg.) ; SCHLEMMER, H. (Hrsg.): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. 2., neu bearbeitete und erweitere Auflage. Berlin and Offenbach : Wichmann Verlag, 2013 (Handbuch Ingenieurgeodäsie). – ISBN 9783879075621
- [Hexagon 2013] HEXAGON ; HEXAGON METROLOGY (Hrsg.): Produktbrochüre Leica T-Scan TS50-A. 2013
- [Hexagon 2021] HEXAGON ; HEXAGON (Hrsg.): Leica Absolute Tracker ATS600 Produktbrochure. 2021. – URL https://www.hexagonmi.com/products/laser-tracker-systems/ leica-absolute-tracker-ats600. – Zugriffsdatum: 09.12.2021
- [Hexagon 2022a] HEXAGON ; HEXAGON (Hrsg.): Absolute Tracker solutions Produktbrochure: Explore our full range of laser tracker systems, from portable and large volume to automated and high volume. 2022. - URL https://www.hexagonmi.com/de-de/products/ laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960. - Zugriffsdatum: 18.01.2022
- [Hexagon 2022b] HEXAGON: Flächenscanner RS-SQUARED: Der weltweit schnellste Scanner für mobile Messarme. 2022. – URL https://hexagon.com/de/products/ rs-squared-area-scanner. – Zugriffsdatum: 04.02.2022
- [Hexagon 2022c] HEXAGON ; HEXAGON (Hrsg.): Leica Absolute Scanner LAS-XL: Der weltweit erste handgeführte 3D-Laserscanner im XL-Format. 2022. – URL https://hexagon.com/de/ products/leica-absolute-scanner-las-xl. – Zugriffsdatum: 04.02.2022
- [Hexagon 2022d] HEXAGON ; HEXAGON (Hrsg.): Das Leica Absolutinterferometer. 2022. – URL https://www.hexagonmi.com/de-de/solutions/technical-resources/ technical-articles/the-leica-absolute-interferometer. – Zugriffsdatum: 26.01.2022

- [Hillemann u. a. 2019a] HILLEMANN, M. ; MEIDOW, J. ; JUTZI, B.: Impact of Different Trajectories on Extrinsic Self-Calibration for Vehicle-based Mobile Laser Scanning Systems. In: ISPRS -International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W16 (2019), S. 119–125
- [Hillemann u. a. 2019b] HILLEMANN, Markus ; WEINMANN, Martin ; MUELLER, Markus S. ; JUT-ZI, Boris: Automatic Extrinsic Self-Calibration of Mobile Mapping Systems Based on Geometric 3D Features. In: *Remote Sensing* 11 (2019), Nr. 16, S. 1955. ISSN 2072-4292
- [Holst u. a. 2015] HOLST, C. ; KUHLMANN, H. ; PAFFENHOLZ, J.-A. ; NEUMANN, I.: TLS im statischen, stop & go sowie kinematischen Einsatz. In: PAFFENHOLZ, Jens-André (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015)*. Augsburg : Wißner, 2015 (Schriftenreihe des DVW), S. 9–26. – ISBN 978-3-95786-059-0
- [Holst u. a. 2016] HOLST, C. ; NEUNER, H. ; WIESER, A. ; WUNDERLICH, T. ; KUHLMANN, H.: Calibration of Terrestrial Laser Scanners: Kalibrierung terrestrischer Laserscanner. In: Allgemeine vermessungs-nachrichten (AVN) 123 (2016), Nr. 6, S. 147–157. – ISSN 00025968
- [Hong u. a. 2017] HONG, S. ; PARK, I. ; LEE, J. ; LIM, K. ; CHOI, Y. ; SOHN, H.-G.: Utilization of a Terrestrial Laser Scanner for the Calibration of Mobile Mapping Systems. In: Sensors 17 (2017), Nr. 3. – ISSN 1424-8220
- [Houshiar u. a. 2015] HOUSHIAR, H.; ELSEBERG, J.; BORRMANN, D.; NÜCHTER, A.: A study of projections for key point based registration of panoramic terrestrial 3D laser scan. In: *Geo-spatial Information Science* 18 (2015), Nr. 1, S. 11–31. – ISSN 1009-5020
- [ISO 2018] ISO: Optics and optical instruments Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 9: Terrestrial laser scanners. 2018. – URL https://www.iso. org/standard/68382.html. – Zugriffsdatum: 19.04.2021
- [Janßen u. a. 2019] JANSSEN, J. ; MEDIC, T. ; KUHLMANN, H. ; HOLST, C.: Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design. In: *Remote Sensing* 11 (2019), Nr. 7, S. 845. – ISSN 2072-4292
- [JCGM 2008a] JCGM: Evaluation of measurement data Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method. 2008. – URL https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_101_2008_E. pdf/325dcaad-c15a-407c-1105-8b7f322d651c. – Zugriffsdatum: 09.08.2022
- [JCGM 2008b] JCGM: Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections, ISO/IEC Guide 98-3). 2008.
 URL https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f
 -baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6. Zugriffsdatum: 09.08.2022
- [Jensen 2021] JENSEN, A.: Ableitung der Qualität der Distanzmessung von Laserscannern aus Intensitätswerten. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Masterarbeit (unveröffentlicht), 2021
- [Jian und Ravani 2016] JIAN, Z. ; RAVANI, B.: Boresight Calibration of Mobile Laser Scanner Using an External Fixture. In: *Journal of Applied Geodesy* 10 (2016), Nr. 3. ISSN 1862-9024
- [Joeckel und Stober 2008] JOECKEL, R. ; STOBER, M.: Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung. 5., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart : Verlag Wittwer, 2008. – ISBN 978-3-87907-443-3
- [Kalman 1960] KALMAN, R. E.: RIAS technical report. Bd. 61-1: New methods and results in linear prediction and filtering theory. Baltimore - Md : RIAS, 1960

- [Kauker und Schwieger 2017] KAUKER, S. ; SCHWIEGER, V.: A synthetic covariance matrix for monitoring by terrestrial laser scanning. In: *Journal of Applied Geodesy* 11 (2017), Nr. 2. – ISSN 18629016
- [Keller 2015] KELLER, F.: Entwicklung eines forschungsorientierten Multi-Sensor-Systems zum kinematischen Laserscanning innerhalb von Gebäuden. 1. Auflage. 2015. – Dissertation. – ISBN 9783844044171
- [Keller und Sternberg 2013] KELLER, F. ; STERNBERG, H.: Multi-Sensor Platform for Indoor Mobile Mapping: System Calibration and Using a Total Station for Indoor Applications. In: *Remote Sensing* 5 (2013), Nr. 11, S. 5805–5824. – ISSN 2072-4292
- [Kermarrec u. a. 2021] KERMARREC, G. ; LÖSLER, M. ; HARTMANN, J.: Analysis of the temporal correlations of TLS range observations from plane fitting residuals. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 171 (2021), S. 119–132. – ISSN 09242716
- [Kern 2010] KERN, F.: Pr
 üfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von Terrestrischen Laserscanner-Systemen – Entwurf V1.0.1. 2010. – URL https://www.laserscanning-europe. com/de/system/files/TLSRichtlinie_07.pdf. – Zugriffsdatum: 19.04.2021
- [Kern und Huxhagen 2008] KERN, F. ; HUXHAGEN, U.: Ansätze zur systematischen Kalibrierung und Prüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). In: DVW (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning Bd. 54. Augsburg : Wißner, 2008, S. 111–124. – ISBN 978-3-8963-9656-3
- [Klingbeil u. a. 2021] KLINGBEIL, L. ; GELFORT, I. ; KUHLMANN, H.: Mobile Mapping: Technologien und Marktübersicht. In: DVW (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2020 (TLS 2020). Augsburg : Wißner-Verlag, 2021 (Schriftenreihe des DVW), S. 195–212
- [Koch 2002] KOCH, K.-R.: Räumliche Helmert-Transformation variabler Koordinaten im Gauß-Helmert- und im Gauß-Markoff-Modell. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV) 127 (2002), Nr. 3, S. 147–152
- [Koch 2008] KOCH, K.-R.: Evaluation of uncertainties in measurements by Monte Carlo simulations with an application for laserscanning. In: *Journal of Applied Geodesy* 2 (2008), Nr. 2.
 URL https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/JAG.2008.008/html. Zugriffs-datum: 11.08.2022. ISSN 1862-9024
- [Kutterer und Schön 2004] KUTTERER, H. ; SCHÖN, S.: Alternativen bei der Modellierung der Unsicherheit beim Messen. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV) 129 (2004), Nr. 6, S. 389–398
- [Lague u. a. 2013] LAGUE, D. ; BRODU, N. ; LEROUX, J.: Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82 (2013), S. 10–26. – ISSN 09242716
- [Le Scouarnec u. a. 2014] LE SCOUARNEC, R. ; TOUZÉ, T. ; LACAMBRE, J. B. ; SEUBE, N.: A New Reliable Boresight Calibration Method for Mobile Laser Scanning Applications. In: ISPRS -International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W1 (2014), S. 67–72
- [Leica 2015] LEICA; AG, Leica G. (Hrsg.): Leica Pegasus:Backpack tragbare mobile Kartierungslösung: Vielseitige und tragbare Plattform zur Umgebungserfassung in Innen- und Außenbereichen. 2015. – URL https://leica-geosystems.com/de-de/products/mobile-sensor-platforms/ capture-platforms/leica-pegasus-backpack. – Zugriffsdatum: 04.01.2022

- [Leica 2016] LEICA ; LEICA GEOSYSTEMS AG (Hrsg.): Leica ScanStation P40 / P30 - Hochauflösende 3D-Laserscanner-Lösung. 2016. - URL https://leica-geosystems. com/de-de/products/laser-scanners/scanners/leica-scanstation-p40--p30. - Zugriffsdatum: 02.02.2022
- [Leica 2018] LEICA: Leica RTC360, Datenblatt: 3D-Umgebungserfassungslösung. 2018.
 URL https://leica-geosystems.com/de-AT/products/laser-scanners/scanners/ leica-rtc360. - Zugriffsdatum: 21.04.2021
- [Leica 2020] LEICA ; AG, Leica G. (Hrsg.): LEICA BLK2GO. 2020. URL https: //shop.leica-geosystems.com/de/de-DE/learn/blk2go/blk2go-technology. - Zugriffsdatum: 04.01.2022
- [Leica 2021a] LEICA ; LEICA GEOSYSTEMS AG (Hrsg.): Datenblatt: Leica Nova MS60. 2021. - URL https://leica-geosystems.com/de-de/products/total-stations/multistation/ leica-nova-ms60. - Zugriffsdatum: 09.12.2021
- [Leica 2021b] LEICA; LEICA GEOSYSTEMS AG (Hrsg.): Leica Geosystems Offers Mobile, Agile 3D Reality Capture Solution for Boston Dynamics Spot: Laser Scanning Industry Leader Combines RTC360 Visual SLAM and LiDAR with Spot Agile Mobile Robot for Fast and Easy-to-Use Reality Capture. 2021. – URL https://leica-geosystems.com/de-de/about-us/news-room /news-overview/2021/02/2021_02_22_boston_dynamics. – Zugriffsdatum: 20.12.2021
- [Leica 2022] LEICA ; LEICA GEOSYSTEMS AG (Hrsg.): Leica Cyclone Verarbeitungssoftware für 3D-Punktwolken. 2022. – URL https://leica-geosystems.com/de-de/products/ laser-scanners/software/leica-cyclone. – Zugriffsdatum: 11.09.2022
- [Lenzmann und Lenzmann 2004] LENZMANN, L.; LENZMANN, E.: Strenge Auswertung des nichtlinearen Gauß-Helmert-Modells. In: Allgemeine vermessungs-nachrichten (AVN) 2004 (2004), Nr. 2, S. 68–73. – ISSN 00025968
- [Leonard und Durrant-Whyte 1991] LEONARD, J. J.; DURRANT-WHYTE, H. F.: Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot. In: Proceedings IROS '91:IE-EE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '91, IEEE, 1991, S. 1442– 1447. – ISBN 0-7803-0067-X
- [Lichti 2007] LICHTI, D.: Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 61 (2007), Nr. 5, S. 307–324. – ISSN 09242716
- [Lichti und Skaloud 2011] LICHTI, D.; SKALOUD, J.: Registration and Calibration. In: Airborne and terrestrial laser scanning. Dunbeath and Boca Raton, Fla. : Whittles and CRC Press, 2011, S. 83–133. – ISBN 978-1-9044-4587-6
- [Lichti u. a. 2019] LICHTI, D. D.; GLENNIE, C. L.; JAHRAUS, A.; HARTZELL, P.: New Approach for Low-Cost TLS Target Measurement. In: *Journal of Surveying Engineering* 145 (2019), Nr. 3, S. 04019008. – ISSN 0733-9453
- [Lichti u. a. 2005] LICHTI, D. D.; GORDON, S. J.; TIPDECHO, T.: Error Models and Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Networks. In: Journal of Surveying Engineering 131 (2005), Nr. 4, S. 135–142. – ISSN 0733-9453
- [Lin u. a. 2013] LIN, Y. ; HYYPPÄ, J. ; KUKKO, A.: Stop-and-go mode: sensor manipulation as essential as sensor development in terrestrial laser scanning. In: Sensors 13 (2013), Nr. 7, S. 8140–8154. – ISSN 1424-8220

- [Lindstaedt u. a. 2012] LINDSTAEDT, M. ; KERSTEN, T. ; MECHELKE, K. ; GRAEGER, T.: Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In: LUHMANN, T. (Hrsg.) ; MÜLLER, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik.* Berlin : Wichmann VDE-Verl., 2012, S. 264–275. – ISBN 978-3-8790-7515-7
- [Lipkowski und Mettenleiter 2019] LIPKOWSKI, S. ; METTENLEITER, M.: Terrestrische Laserscanner – Im Fokus der Genauigkeit. In: *Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS 2019)*. Augsburg : Wißner-Verlag, 2019 (Schriftenreihe des DVW), S. 75–87. – ISBN 978-3-95786-231-0
- [Luhmann u. a. 2020] LUHMANN, T.; ROBSON, S.; KYLE, S.; BÖHM, J.: Close-range photogrammetry and 3D imaging. 3rd edition. Berlin : de Gruyter, 2020 (De Gruyter STEM). – ISBN 9783110607246
- [Maar und Zogg 2021] MAAR, H.; ZOGG, H.-M.; LEICA GEOSYSTEMS AG (Hrsg.): WFD Wave Form Digitizer Technology, White paper. 2021. - URL https://leica-geosystems.com/de-de/ about-us/content-features/wave-form-digitizer-technology-white-paper. - Zugriffsdatum: 01.02.2021
- [Medić u. a. 2017] MEDIĆ, T. ; HOLST, C. ; KUHLMANN, H.: Towards System Calibration of Panoramic Laser Scanners from a Single Station. In: Sensors 17 (2017), Nr. 5:1145. – URL https://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/1145. – ISSN 1424-8220
- [Mettenleiter u. a. 2015] METTENLEITER, M. ; HARTLEB, F. ; KRESSER, S. ; FRÖHLICH, C.: Die Bibliothek der Technik. Bd. Band 371: Laserscanning: Phasenbasierte Lasermesstechnik für die hochpräzise und schnelle dreidimensionale Umgebungserfassung. München : Verlag Moderne Industrie, 2015. – ISBN 9783862360772
- [Metzler 2021] METZLER, B.: Visual Inertial System (VIS) Technology: What is it? How was it developed? What's coming? 2021
- [Moritani u. a. 2018] MORITANI, R. ; KANAI, S. ; DATE, H. ; WATANABE, M. ; NAKANO, T. ; YAMAUCHI, Y.: Cylinder-based Efficient and Robust Registration and Model Fitting of Laserscanned Point Clouds for As-built Modeling of Piping Systems. In: Computer-Aided Design and Applications 16 (2018), Nr. 3, S. 396–412
- [Müller-Stoy 1986] MÜLLER-STOY, P.: Zukünftige Rechnerarchitekturen. In: HANSEN, H. R. (Hrsg.); KRALLMANN, H. (Hrsg.); MERTENS, P. (Hrsg.); SCHEER, A.-W. (Hrsg.); SEIBT, D. (Hrsg.); STAHLKNECHT, P. (Hrsg.); STRUNZ, H. (Hrsg.); THOME, R. (Hrsg.); SCHULZ, A. (Hrsg.): Die Zukunft der Informationssysteme Lehren der 80er Jahre Bd. 17. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1986, S. 150–163. ISBN 978-3-540-16802-7
- [Muralikrishnan u.a. 2015] MURALIKRISHNAN, B. ; FERRUCCI, M. ; SAWYER, D. ; GERNER, G. ; LEE, V. ; BLACKBURN, C. ; PHILLIPS, S. ; YAKOVLEV, Y. ; ANDREY, A. ; MILLIGAN, S. ; PALMATEER, J.: Volumetric Performance Evaluation of a Laser Scanner Based on Geometric Error Model. In: *Precision Engineering* 40 (2015), S. 139–150. – ISSN 0141-6359
- [NavVis 2021] NAVVIS ; NAVVIS (Hrsg.): Evaluierung der Genauigkeit von mobilen Mappingsystemen in Innen- und Außenbereichen: Eine Bewertung der Datenqualität des NavVis VLX im Vergleich zu einem terrestrischen Laserscanner, inkl. Fallbeispielen für Anwendungen in Innen- und Außenbereichen. 2021. – URL https://www.navvis.com/de/resources/white-papers/indoor-outdoor?hsCtaTracking= e8a5fd06-f055-43c9-8e11-6f95b85eaa6b|9e458e37-b6ba-4e9b-8e06-3b8295d236f3
- [NavVis 2022a] NAVVIS ; NAVVIS (Hrsg.): NavVis M6 Produktbeschreibung. 2022. URL hhttps://www.navvis.com/de/resources/brochures/navvis-m6. Zugriffsdatum: 07.01.2022

- [NavVis 2022b] NAvVIS ; NAvVIS (Hrsg.): NavVis VLX 2.0 Produktbeschreibung. 2022. URL https://www.navvis.com/de/vlx. Zugriffsdatum: 07.01.2022
- [Neitzel 2006] NEITZEL, F.: Untersuchung des Achssystems und des Taumelfehlers terrestrischer Laserscanner mit tachymetrischem Messprinzip. In: DVW (Hrsg.): Terrestrisches Laser-Scanning Bd. 51. Augsburg : Wißner-Verl., 2006, S. 15–34. – ISBN 978-3-89639-555-9
- [Neitzel u.a. 2014] NEITZEL, F. ; GORDON B. ; WUJANZ, D.: DVW-Merkblatt 07-2014 - Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). 2014. – URL https://dvw.de/veroeffentlichungen/standpunkte/1149-verf ahren-zur-standardisierten-ueberpruefung-von-terrestrischen-laserscannern-tls. – Zugriffsdatum: 19.04.2021
- [Neitzel und Neumann 2013] NEITZEL, F. ; NEUMANN, I.: Scanning in Motion Kinematisches TLS mittels mobiler Plattformen. In: DVW (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2013 (TLS 2013) Bd. 72. Augsburg : Wißner, 2013, S. 89–106. – ISBN 978-3-89639-952-6
- [Nensel u. a. 2021] NENSEL, J. ; RASCHKE, H. ; STUDNICKA, N. ; HÖGERL, A.: Einsatz eines mobilen Robotersystems zur automatisierten Messwerterfassung in einem Grubenbetrieb der K+S Minerals and Agriculture GmbH. In: BENNDORF, Jörg (Hrsg.): Tagungsband Umwelt, Energie und Rohstoffe 2021 & 21. Geokinematischer Tag. Freiberg : Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2021, S. 53–65
- [Neumann 2009] NEUMANN, I.: Zur Modellierung eines erweiterten Unsicherheitshaushaltes in Parameterschätzung und Hypothesentests: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., Nr. 277, 2009. München: Deutsche Geodätische Kommission (DGK), 2009 (Dissertation, Reihe C, Nr. 634). – ISBN 978-3-7696-5056-4
- [Niemeier 2008] NIEMEIER, W.: Ausgleichungsrechnung: Statistische Auswertemethoden. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin and New York : Walter de Gruyter, 2008. – ISBN 3110190559
- [Nüchter u. a. 2013] NÜCHTER, Andreas ; ELSEBERG, Jan ; BORRMANN, Dorit: Irma3D An Intelligent Robot for Mapping Applications. In: *IFAC Proceedings Volumes* 46 (2013), Nr. 29, S. 119–124. – ISSN 14746670
- [Ozendi u. a. 2017] OZENDI, M.; AKCA, D.; TOPAN, H.: A generic point error model for TLS derived point clouds. In: REMONDINO, F. (Hrsg.); SHORTIS, M R. (Hrsg.): Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV, SPIE, 2017 (SPIE Proceedings), S. 103320J
- [Paffenholz 2012] PAFFENHOLZ, J.-A.: Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., Nr. 302, 2012. München : Deutsche Geodätische Kommission (DGK), 2012 (Dissertation, Reihe C, Nr. 302). – ISBN 978-3-7696-5101-0
- [Paffenholz u. a. 2017] PAFFENHOLZ, J.-A.; ALKHATIB, H.; STENZ, U.; NEUMANN, I.: Aspekte der Qualitätssicherung von Multi-Sensor-Systemen. In: Allgemeine Vermessungs-nachrichten (AVN) 124 (2017), Nr. (im peer-review akzeptierter Beitrag), S. 15. – ISSN 00025968
- [Paffenholz und Bae 2012] PAFFENHOLZ, J.-A. ; BAE, K.-H.: Geo-referencing point clouds with transformational and positional uncertainties. In: *Journal of Applied Geodesy* 6 (2012), Nr. 1. ISSN 1862-9024
- [Paffenholz 2015] PAFFENHOLZ, Jens-André (Hrsg.): Schriftenreihe des DVW. Bd. Band 81: Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015): Beiträge zum 147. DVW-Seminar am 7. Und 8. Dezember 2015 in Fulda. Augsburg : Wißner, 2015. – ISBN 978-3-95786-059-0

- [Pearson 1900] PEARSON, Karl: X. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 50 (1900), Nr. 302, S. 157–175. – ISSN 1941-5982
- [Pentenrieder 2005] PENTENRIEDER, K.: Sensor Fusion using the Kalman Filter. 2005. URL http://campar.in.tum.de/Chair/KalmanFilter. Zugriffsdatum: 09.06.2022
- [Puente u. a. 2013] PUENTE, I. ; GONZÁLEZ-JORGE, H. ; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. ; ARIAS, P.: Review of mobile mapping and surveying technologies. In: *Measurement* 46 (2013), Nr. 7, S. 2127–2145. – ISSN 02632241
- [Reiterer u. a. 2022] REITERER, A. ; OLSHAUSEN, P. von ; MAUS, P. ; FREY, S. ; SCHWARZER,
 S.: Aufbau und Kalibration eines komplexen mobilen Mulitsensorsystem Ein Überblick. In: DVW (Hrsg.): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022. Augsburg : Wißner-Verlag, 2022 (Schriftenreihe des DVW), S. 53–63. ISBN 978-3-95786-314-0
- [Reshetyuk 2006] RESHETYUK, Y.: Trita-TEC-LIC. Bd. 06-003: Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. Stockholm and Division of Geodesy, Royal Institute of Technology, 2006. – ISBN 978-9-1855-3907-9
- [Rieger u. a. 2010] RIEGER, P. ; STUDNICKA, N. ; PFENNIGBAUER, M. ; ZACH, G.: Boresight alignment method for mobile laser scanning systems. In: *Journal of Applied Geodesy* 4 (2010), Nr. 1. – ISSN 1862-9024
- [RIEGL 2021] RIEGL ; RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GMBH 2021 (Hrsg.): RIEGL VMR. 2021. - URL http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/ produktdetail/product/scanner/77/. - Zugriffsdatum: 20.12.2021
- [Riegl 2021] RIEGL ; RIEGL (Hrsg.): RIEGL VMX-2HA. 2021. URL http://www.riegl. com/nc/products/mobile-scanning/produktdetail/product/scanner/56/. - Zugriffsdatum: 05.07.2022
- [Rietdorf 2005] RIETDORF, A.: Reihe C. Bd. 582: Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip: Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2004. München : Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C.H.Beck, 2005. – ISBN 3769650212
- [Runne u. a. 2001] RUNNE, H.; NIEMEIER, W.; KERN, F.: Application of laser scanners to determine the geometry of buildings. In: GRÜN, A. (Hrsg.); KAHMEN, H. (Hrsg.): Proc., Optical 3-DMeasurement Techniques V. Karlsruhe : Wichmann, 2001, S. 41–48
- [Rusinkiewicz und Levoy 2001] RUSINKIEWICZ, S. ; LEVOY, M.: Efficient variants of the ICP algorithm. In: Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001, S. 145–152
- [Schild 2018] SCHILD, N.: Optimierung des Kalibriervorganges eines k-TLS basierten Multi-Sensor-Systems durch genetische Algorithmen: Poster - ÖbVI Petersen Preis, 177. DVW-Seminar, Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018). 2018
- [Schmitz u. a. 2021] SCHMITZ, B. ; KUHLMANN, H. ; HOLST, C.: Towards the empirical determination of correlations in terrestrial laser scanner range observations and the comparison of the correlation structure of different scanners. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 182 (2021), S. 228–241. – ISSN 09242716

- [Schön u. a. 2018] SCHÖN, S. ; BRENNER, C. ; ALKHATIB, H. ; COENEN, M. ; DBOUK, H. ;
 GARCIA-FERNANDEZ, N. ; FISCHER, C. ; HEIPKE, C. ; LOHMANN, K. ; NEUMANN, I. ; NGUYEN,
 U. ; PAFFENHOLZ, J.-A. ; PETERS, T. ; ROTTENSTEINER, F. ; SCHACHTSCHNEIDER, J. ; SESTER,
 M. ; SUN, L. ; VOGEL, S. ; VOGES, R. ; WAGNER, B.: Integrity and Collaboration in Dynamic
 Sensor Networks. In: Sensors 18 (2018), Nr. 7. ISSN 1424-8220
- [Schwarz 2004] SCHWARZ, W.: Genauigkeitsmaße richtig interpretieren. In: DVW (Hrsg.): Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen - Weimar 2004. Augsburg : Wissner-Verlag, 2004 (Schriftenreihe des DVW), S. 77—96. – ISBN 978-3-89639-451-4
- [Schweitzer und Schwieger 2011] SCHWEITZER, J. ; SCHWIEGER, V.: Modeling of quality for engineering geodesy processes in civil engineering. In: *Journal of Applied Geodesy* 5 (2011), Nr. 1, S. 13–22. – ISSN 1862-9024
- [Schwieger und Zhang 2019] SCHWIEGER, V. ; ZHANG, L.: Qualität in der Ingenieurgeodäsie Begriff und Modellierung. In: DVW E.V. (Hrsg.): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2019. Augsburg : Wißner-Verlag, 2019 (Schriftenreihe des DVW), S. 9–30. – ISBN 978-3-95786-218-1
- [Shahraji und Larouche 2022] SHAHRAJI, M. H.; LAROUCHE, C.: Case Study: Rigorous Boresight Alignment of a Marine Mobile LiDAR System Addressing the Specific Demands of Port Infrastructure Monitoring. In: *Marine Geodesy* (2022), S. 1–33. – ISSN 0149-0419
- [Shahraji u. a. 2020] SHAHRAJI, M. H. ; LAROUCHE, C. ; COCARD, M.: Analysis of Systematic Errors of Mobile LiDAR Systems: A Simulation Approach. In: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences V-1-2020 (2020), S. 253–260
- [Sheehan u. a. 2014] SHEEHAN, M.; HARRISON, A.; NEWMAN, P.: Automatic Self-calibration of a Full Field-of-View 3D n-Laser Scanner. In: KHATIB, Oussama (Hrsg.); KUMAR, Vijay (Hrsg.); SUKHATME, Gaurav (Hrsg.): *Experimental Robotics* Bd. 79. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 165–178. – ISBN 978-3-642-28571-4
- [Siebert und Sommer 2004] SIEBERT, Bernd R. L. ; SOMMER, K.-D.: Weiterentwicklung des GUM und Monte-Carlo-Techniken (New Developments of the GUM and Monte Carlo Techniques). In: tm - Technisches Messen 71 (2004), Nr. 2, S. 67–80. – ISSN 0171-8096
- [Simon 2006] SIMON, D.: Optimal state estimation: Kalman, H[infinity], and nonlinear approaches. Hoboken NJ: Wiley, 2006 (Wiley-Interscience). – ISBN 0-471-70858-5
- [Skaloud und Lichti 2006] SKALOUD, J. ; LICHTI, D.: Rigorous approach to bore-sight selfcalibration in airborne laser scanning. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 61 (2006), Nr. 1, S. 47–59. – ISSN 09242716
- [Solà 2014] SOLÀ, J.: Simulataneous localization and mapping with the extended Kalman filter: A very quick guide... with Matlab code! 2014. - URL https://www.iri.upc.edu/people/jsola/ JoanSola/objectes/curs_SLAM/SLAM2D/SLAM%20course.pdf. - Zugriffsdatum: 06.06.2022
- [Soudarissanane 2016] SOUDARISSANANE, S. S.: The geometry of terrestrial laser scanning; identification of errors, modeling and mitigation of scanning geometry. Delft, TU Delft, Dissertation, 2016
- [Stempfhuber 2004] STEMPFHUBER, Werner V.: Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2004. München : Deutsche Geodätische Kommission (DGK), 2004 (Dissertation, Reihe C, Nr. 576). – ISBN 3769650158

- [Stenz u. a. 2017] STENZ, U. ; HARTMANN, J. ; PAFFENHOLZ, J.-A. ; NEUMANN, I.: A Framework Based on Reference Data with Superordinate Accuracy for the Quality Analysis of Terrestrial Laser Scanning-Based Multi-Sensor-Systems. In: Sensors (Basel, Switzerland) 17 (2017), Nr. 8
- [Stenz u. a. 2020] STENZ, U. ; HARTMANN, J. ; PAFFENHOLZ, J.-A. ; NEUMANN, I.: High-Precision 3D Object Capturing with Static and Kinematic Terrestrial Laser Scanning in Industrial Applications—Approaches of Quality Assessment. In: *Remote Sensing* 12 (2020), Nr. 2, S. 290. – ISSN 2072-4292
- [Sternberg 1998] STERNBERG, H.: Mobiles Vermessungssystem KiSS. In: HEISTER, H. (Hrsg.): Hybride Vermessungsysteme. Stuttgart : Wittwer, 1998 (Schriftenreihe des DVW), S. 178–192.
 – ISBN 387919257X
- [Sternberg 2000] STERNBERG, H.: Zur Bestimmung der Trajektorie von Landfahrzeugen mit einem hybriden Meßsystem. Neubiberg, Univ. der Bundeswehr München, Fak. für Bauingenieurund Vermessungswesen, Studiengang Geodäsie und Geoinformationen, Dissertation, 2000. – 158 S
- [Strübing 2015] STRÜBING, T.: Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II. Neubiberg, Univ. der Bundeswehr München, Fak. für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Studiengang Geodäsie und Geoinformationen, Dissertation, 2015. – 178 S
- [Strübing und Neumann 2013] STRÜBING, T.; NEUMANN, I.: Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV) 138 (2013), Nr. 3, S. 210–221
- [technet GmbH 2021] TECHNET GMBH ; TECHNET GMBH (Hrsg.): Produktdokmentation: Scantra - Beyond clouds. 2021. - URL https://www.technet-gmbh.com/produkte/scantra/. -Zugriffsdatum: 10.11.2021
- [Timmen 2016] TIMMEN, A.: Definition und Ableitung eines Qualitätsindexes zur Visualisierung der Qualitätsparameter von 3D-Punktwolken in einer virtuellen Umgebung. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Masterarbeit (unveröffentlicht), 2016
- [Trimble 2021] TRIMBLE ; TRIMBLE INC. (Hrsg.): Trimble and Boston Dynamics: Connected Robotics and Precision Data Collection for Construction. 2021. – URL https://construction. trimble.com/en/spot. – Zugriffsdatum: 20.12.2021
- [Trimble 2021] TRIMBLE ; TRIMBLE INC. (Hrsg.): Trimble SX12 Datenblatt: SCANNING-TOTALSTATION. 2021. - URL https://de.geospatial.trimble.com /products-and-solutions/trimble-sx12. - Zugriffsdatum: 28.04.2022
- [Trimble 2022] TRIMBLE ; TRIMBLE INC. (Hrsg.): Trimble MX50 Datenblatt. 2022. URL https://de.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-mx50. - Zugriffsdatum: 05.07.2022
- [Trusheim 2018] TRUSHEIM, P.: Entwicklung und Implementierung eines Filtermodells zur punktgenauen (Geo-)referenzierung eines k-TLS basierten Multi-Sensor-Systems. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Masterarbeit (unveröffentlicht), 2018
- [Ullrich und Fürst 2017] ULLRICH, A. ; FÜRST, C.: Vollautomatischer Ansatz für die Onboard-Datenregistrierung im terrestrischen Laserscanning. In: PAFFENHOLZ, J.-A. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017) Bd. 88. Augsburg : Wißner, 2017, S. 145–153. – ISBN 978-3-95786-145-0

- [Ulrich 2016] ULRICH, T.: Uncertainty Modelling of High-precision Trajectories for Industrial Real-time Measurement Applications. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2016
- [Underwood u. a. 2007] UNDERWOOD, J.; HILL, A.; SCHEDING, S.: Calibration of range sensor pose on mobile platforms. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and* Systems, 2007. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2007, S. 3866–3871. – ISBN 978-1-4244-0911-2
- [Urbančič u. a. 2019] URBANČIČ, Tilen ; ROŠKAR, Žiga ; KOSMATIN FRAS, Mojca ; GRIGILLO, Dejan: New Target for Accurate Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Point Cloud Registration. In: Sensors 19 (2019), Nr. 14. – ISSN 1424-8220
- [USIBD 2016] USIBD ; U.S. INSTITUTE OF BUILDING DOCUMENTATION (Hrsg.): USIBD Level of Accuracy (LOA) Specification Guide: Guide for USIBD Document C220TM: Level of Accuracy (LOA) Specification for Building Documentation. 2016.
 URL https://cdn.ymaws.com/www.nysapls.org/resource/resmgr/2019_conference/ handouts/hale-g_bim_loa_guide_c120_v2.pdf. - Zugriffsdatum: 11.01.2022
- [Velodyne 2021] VELODYNE: Velodyne's Puck (Product Guide). 2021. URL https:// velodynelidar.com/products/puck/. – Zugriffsdatum: 04.01.2022
- [Vennegeerts 2011] VENNEGEERTS, Harald: Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung für Mobile-Mapping-Systeme: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., Nr. 290, 2010. München : Deutsche Geodätische Kommission (DGK), 2011 (Dissertation, Reihe C, Nr. 657). – ISBN 978-3-7696-5069-3
- [ViAmetris 2018] VIAMETRIS ; VIAMETRIS (Hrsg.): *IMS3D data sheet.* 2018. URL https: //viametris.com/trolley-mobile-scanners/. – Zugriffsdatum: 30.09.2022
- [ViAmetris 2019] VIAMETRIS; VIAMETRIS (Hrsg.): BMS3D-HD: Backpack mobile scanner. 2019. - URL https://viametris.com/backpack-mobile-scanners/. - Zugriffsdatum: 30.09.2022
- [Vogel 2020] VOGEL, S.: Kalman filtering with state constraints applied to multi-sensor systems and georeferencing: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., Nr. 364, 2020. München : Deutsche Geodätische Kommission (DGK), 2020 (Dissertation, Reihe C, Nr. 856). – ISBN 978-3-7696-5268-0
- [Vogel u. a. 2019] VOGEL, S. ; ALKHATIB, H. ; BUREICK, J. ; MOFTIZADEH, R. ; NEUMANN,
 I.: Georeferencing of Laser Scanner-Based Kinematic Multi-Sensor Systems in the Context of Iterated Extended Kalman Filters Using Geometrical Constraints. In: Sensors 19 (2019), Nr. 10.
 – ISSN 1424-8220
- [Vogel u. a. 2022] VOGEL, S. ; ERNST, D. ; NEUMANN, I. ; ALKHATIB, H.: Recursive Gauss-Helmert model with equality constraints applied to the efficient system calibration of a 3D laser scanner. In: Journal of Applied Geodesy 16 (2022), Nr. 1, S. 37–57. – ISSN 18629016
- [Walsh 2015] WALSH, G.; LEICA GEOSYSTEMS AG (Hrsg.): Leica ScanStation White Paper. 2015. – URL https://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/scanners/ leica-scanstation-p40--p30. – Zugriffsdatum: 19.04.2021
- [Wang u. a. 2017] WANG, L. ; MURALIKRISHNAN, B. ; RACHAKONDA, P. ; SAWYER, D.: Determining geometric error model parameters of a terrestrial laser scanner through two-face, lengthconsistency, and network methods. In: *Measurement Science and Technology* 28 (2017), Nr. 6, S. 065016 (14pp)
- [Weicker 2002] WEICKER, K.: *Evolutionäre Algorithmen.* 1. Aufl. Stuttgart and Leipzig and Wiesbaden : Teubner, 2002 (Leitfäden der Informatik). ISBN 3519003627

- [Westoby u. a. 2012] WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M.: 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: *Geomorphology* 179 (2012), S. 300–314. – ISSN 0169555X
- [Witte und Sparla 2015] WITTE, B. ; SPARLA, P.: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 8., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin : VDE VERLAG GMBH and Wichmann Verlag, 2015. – ISBN 978-3-8790-7552-2
- [Witte u. a. 2020] WITTE, B. ; SPARLA, P. ; BLANKENBACH, J.: Vermessungskunde für das Bauwesen mit Grundlagen des Building Information Modeling (BIM) und der Statistik. 9., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin : VDE VERLAG GMBH and Wichmann Verlag, 2020.
 - ISBN 978-3-8790-7658-1
- [Wörn und Brinkschulte 2005] WÖRN, H. ; BRINKSCHULTE, U.: Echtzeitsysteme: Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen. Berlin and Heidelberg and New York : Springer, 2005 (eXamen.press). – ISBN 978-3-5402-0588-3
- [Wujanz 2016] WUJANZ, D.: Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring: Zugl.: Berlin, Univ., Diss., 2016. München : Deutsche Geodätische Kommission (DGK), 2016 (Dissertation, Reihe C, Nr. 775). – ISBN 978-3-7696-5187-4
- [Wujanz u. a. 2017] WUJANZ, D. ; BURGER, M. ; METTENLEITER, M. ; NEITZEL, F. ; TSCHIR-SCHWITZ, F. ; KERSTEN, T.: Ein intensitätsbasiertes stochastisches Modell für terrestrische Laserscanner – Erste Untersuchungen der Z+F IMAGER 5006h und 5010. In: LUHMANN, T. (Hrsg.) ; SCHUMACHER, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik.* Berlin : Wichmann, 2017, S. 16–26. – ISBN 978-3-8790-7625-3
- [Wujanz u. a. 2018a] WUJANZ, D. ; BURGER, M. ; TSCHIRSCHWITZ, F. ; NIETZSCHMANN, T. ; NEITZEL, F. ; KERSTEN, T. P.: Determination of Intensity-Based Stochastic Models for Terrestrial Laser Scanners Utilising 3D-Point Clouds. In: Sensors 18 (2018), Nr. 7. – ISSN 1424-8220
- [Wujanz und Neitzel 2015] WUJANZ, D. ; NEITZEL, F.: Modellbasierte Standpunktplanung für terrestrische Laserscanner unter ökonomischen Gesichtspunkten. In: LUHMANN, Thomas (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik.* Berlin : Wichmann, 2015, S. 60–72.
 – ISBN 978-3-8790-7553-9
- [Wujanz u. a. 2018b] WUJANZ, D. ; SCHALLER, S. ; GIELSDORF, F. ; GRÜNDIG, L.: Plane-based Registration of Several Thousand Laser Scans on Standard Hardware. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2 (2018), S. 1207–1212
- [Wunderlich u. a. 2013] WUNDERLICH, T.; WASMEIER, P.; OHLMANN-LAUBER, J.; SCHÄFER,
 T.; REIDL, F.: Objective Specifications of Terrestrial Laserscanners A Contribution of the Geodetic Laboratory at the Technische Universität München. 2013
- [Zámečníková u. a. 2014] ZÁMEČNÍKOVÁ, M. ; WIESER, A. ; WOSCHITZ, H. ; RESSL, C.: Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning. In: Journal of Applied Geodesy 8 (2014), Nr. 4. – ISSN 18629016
- [Z+F 2010] Z+F ; ZOLLER + FRÖHLICH GMBH (Hrsg.): Z+F IMAGER® 5010, Datenblatt. 2010. – URL https://www.zofre.de/laserscanner/3d-laserscanner/z-f-imagerr-5010. – Zugriffsdatum: 25.01.2022
- [Z+F 2012] Z+F; ZOLLER + FRÖHLICH GMBH (Hrsg.): Z+F PROFILER® 9012, Datenblatt. 2012. – URL https://www.zofre.de/laserscanner/2d-laserscanner/z-f-profilerr-9012. – Zugriffsdatum: 25.01.2022

- [Z+F 2018] Z+F ; ZOLLER + FRÖHLICH GMBH (Hrsg.): Z+F IMAGER® 5016, Datenblatt. 2018. – URL https://www.zofre.de/laserscanner/3d-laserscanner/z-f-imagerr-5016. – Zugriffsdatum: 25.01.2022
- [Z+F 2022a] Z+F; ZOLLER + FRÖHLICH GMBH (Hrsg.): Z+F LaserControl®, Laserscanning Software. 2022. – URL https://www.zofre.de/laserscanner/laserscanning-software/z-f -lasercontrolr. – Zugriffsdatum: 11.09.2022
- [Z+F 2022b] Z+F; ZOLLER + FRÖHLICH GMBH (Hrsg.): Z+F PROFILER® 9020, Datenblatt. 2022. - URL https://www.zofre.de/laserscanner/2d-laserscanner/z-f-profiler-9020. - Zugriffsdatum: 02.02.2022
- [Zhao u. a. 2017] ZHAO, X. ; ALKHATIB, H. ; KARGOLL, B. ; NEUMANN, I.: Statistical evaluation of the influence of the uncertainty budget on B-spline curve approximation. In: *Journal of Applied Geodesy* 11 (2017), Nr. 4. – ISSN 18629016
- [Zwiener 2019] ZWIENER, Jan: Robuste Zustandsschätzung zur Navigation und Regelung autonomer und bemannter Multikopter mit verteilten Sensoren: Zugl.: Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt, Heft 54. München and Darmstadt : Deutsche Geodätische Kommission (DGK), 2019 (Dissertation, Reihe C, Nr. 833). – ISBN 978-3-7696-5245-1

Abbildungsverzeichnis

1.1	Darstellung einer 3D-Objektaufnahme eines Schiffsdecks mit s-TLS oben und k-TLS unten.	3
2.1	Darstellung der Prozesskette bei der Beschichtung von Megayachten (Hartmann u. a., 2021)	8
2.2	Darstellung (schwarze Punkte) der einzelne Messwerte x_i , sowie die Größen Erwar- tungswert μ_x und wahrer Wert \tilde{X} . Des Weiteren sind die Größen Präzision σ und	Ũ
	Richtigkeit δ dargestellt (Witte u. a., 2020)	10
$2.3 \\ 2.4$	Überblick der Methoden der 3D-Objekterfassung in der industriellen Fertigung Darstellung des Verhältnisses zwischen Genauigkeit und Objektgröße bei unterschied-	13
	lichen industriellen Messverfahren, mit CMM (Bösemann, 2017).	14
2.5	Das Messprinzip des TLS.	15
2.6	Übersicht der unterschiedlichen Aufnahmestrategien, Plattformen und Registrierungs-	
	verfahren beim TLS (Holst u.a., 2015).	20
2.7	Ablaufdiagramm einer s-TLS-basierten 3D-Objektaufnahme	21
2.8	Darstellung eines Zielzeichens für das s-TLS.	24
2.9	Einflussgrößen beim s-TLS (Geist, 2017)	26
2.10	Ablenkungsvariationen beim k-TLS, links: oszillierend um eine Achse, mittig: rotie-	
	rend um eine Achse, rechts: rotierend um zwei Achsen (Vennegeerts, 2011)	30
2.11	Das Prinzip der k-TLS-basierten Objekterfassung (Hesse, 2007)	30
2.12	Methoden der Georeferenzierung beim k-TLS für den Indoor-Bereich nach Neitzel	
	und Neumann (2013)	31
2.13	Einteilung der Methoden für die 3D-Objekterfassung nach Effizienz und Genauigkeit.	33
2.14	Das Prinzip einer k-TLS-basierten Objekterfassung nach Ehm und Hesse (2012)	34
2.15	Das Prinzip der exakten Zuordnung zwischen den Laserscannerprofilen und der Ge-	
	oreferenzierungsmessung. Darstellung einer gescannten Wand (Blaue Linie Hinweg	
	und rote Linie Ruckweg) mit einer Verschiebung von 9 Profilen (Abbildung mittig)	
0.10	und 10 Profilen (Abbildung rechts) (Dorndorf u. a., 2015).	37
2.16	Darstellung der beiden T-Probe Mountpoints 1 (links) und 2 (mittig) mit entspre- chender Orientierung des Koordinatensystems b bzw. der Montage der T-Probe (ohne	
	vorderer Teil der Tastspitze) am Rahmen mit Laserscanner (rechts)	38
2.17	Darstellung der 6 DoF-Georeferenzierungmessung vom Leica AT960 zur T-Probe.	
	Rote Linie Messung AIFM zum CCR und grüne Linien Messung Kamera zu LED.	
	Die Abbildung entstammt aus Hartmann u. a. (2018a) und wurde hier um die Ko-	
	ordinatensysteme des Laserscanners (s) , der T-Probe (b) , des Lasertrackers (l) und	
~	des übergeordneten Referenzsystems (r) ergänzt	39
2.18	Das k-TLS-basierte MSS, bestehend aus Laserscanner, T-Probe und Lasertracker,	10
	abgeanderte Abbildung aus Hartmann u.a. (2019)	40
3.1	Darstellung der Gesamtrotation zwischen dem Ausgangs- a und dem Zielkoordain-	
	tensystem z . Die Rotation erfolgt in der Reihenfolge einzelnen Rotationen in der	
	räumlichen Transformation, Abbildung nach Le Scouarnec u.a. (2014)	42
3.2	Darstellung der skalaren Größen (Abweichungen), welche die Beziehung zwischen	
	Messwert (x_i) und Messergebnis $(\bar{X}$ bzw. $\mu_x)$ beschreiben (Heunecke u. a., 2013)	44
3.3	Darstellung unterschiedlicher WDF aus Schwarz (2004).	48

3.4	Darstellung der Unsicherheitsschätzung durch MCS, Abbildung nach GUM aus JCGM (2008a).	49
3.5	Darstellung der zeitlichen Einordnung der a priori und a posteriori Zustandsschät- zung und der dazugehörigen VKM	57
4.1	Grundlegender Ablauf der Systemkalibrierung, mit den wesentlichen Schritten, Schaf- fung einer Kalibrierumgebung, Objekterfassung durch das k-TLS-basierte MSS und Parameterschätzung im Ausgleichungsmodell.	66
4.2	Herleitung der Korrelationen im stochastischen Modell aus physikalischen Eingangs- größen, eigene Darstellung nach Strübing (2015)	70
4.3	Eignung eines Referenzkörpers mir fünf unterschiedlich angebrachten Ebenen hin- sichtlich der zu bestimmenden Parameter für eine Profillaserscanner (Strübing und Neumann 2013)	71
4.4	Sensitivitäten der einzelnen DoF in Bezug zu unterschiedliche angeordneter Referen- zebenen.	72
4.5	Darstellung des wechselseitigen Einflusses zwischen Translationen und Rotationen bei der Systemkalibrierung.	73
4.6	Ablaufschema der Monte-Carlo-Simulation zur Optimierung der Referenzgeometrien, eigene Darstellung nach Dorndorf (2014).	75
4.7	Anordnung von Laserscanner und elf RE, bei der MCS. In rot dargestellt die 100 pro RE berechneten Laserscanner-Profilpunkte	78
4.8	Anordnung von Laserscanner und sechs Zylindern, bei der MCS. Des Weiteren sind die berechneten 100 Schnittpunkte pro RE und dem Laserscanner-Profil dargestellt.	80
4.9	Darstellung der gesuchten Größen und des Aufbaus für die automatisierte Optimie- rung der RE mit Hilfe eines GA. Abgeänderte Darstellung aus Hartmann u. a. (2019)	. 81
4.10	Ablaufes der automatisierten Optimierung einer RE am Beispiel der Rotation κ (Schild, 2018)	82
4.11	Darstellung der aus elf RE bestehenden festen Kalibrierumgebung im Labor des GIH. An der hinteren Wand befinden sich die Referenzpunkte (Zielzeichen), welche mit CCR bestückt werden können. Über dies kann die Stationierung des Lasertrackers	
4 1 0	erfolgen	85
4.12	Messanordnung von Laserscanner mit T-Probe und Lasertracker bei der Systemka- librierung.	86
4.13	Selektion und Reduktion der Laserscannerbeobachtungen für die Ausgleichung im GHM	90
4.14	Darstellung der Widersprüche aus Messung 1 (Z+F IAMGER 5010) mit elf RE.	94
4.15	Darstellung der Widersprüche aus Messung 2 (Z+F IAMGER 5016) mit elf RE.	95
4.16	Darstellung der Widersprüche aus Messung 1 (Z+F IMAGER 5010) mit elf RE, nach Berücksichtigung eines Distanzoffsets von 0,2 mm für die Distanzmessung.	96
4.17	Darstellung der Widersprüche aus Messung 2 (Z+F IMAGER 5016) mit elf RE, nach Berücksichtigung eines Distanzoffsets von $0,2$ mm für die Distanzmessung	96
5.1	Darstellung der k-TLS-basierten 3D-Objekterfassung (rote Punkte), ohne Berück- sichtigung der Bewegung zwischen den Epochen $k - 1$ und k .	102
5.2	Darstellung einer linearen und gleichförmigen Bewegung beim k-TLS, die Profilpunk- te werden um gleichförmige Beträge Δx verschoben, es entsteht eine gleichförmige Helix.	104
5.3	Darstellung einer unregelmäßigen bzw. beschleunigten Bewegung beim k-TLS, die Profilpunkte werden um nicht gleichförmige Beträge Δs verschoben, es entsteht eine	
	ungleichmäßige Helix.	105

5.4	Links: linearer Zusammenhang führt zu normalverteilter Abbildung, Mitte: Nichtli- nearer Zusammenhang führt zu nicht mehr normalverteilter Abbildung, somit ist KF nicht mehr anwendbar. Bechts: Linearisierung um aktuellen Zustand führt wieder zu
5.5	normalverteilter Abbildung (Solà, 2014, S. 13)
5.6	u. a., 2021)
5.7	und die ungefähren Trajektorien der k-TLS-Messungen
F 0	Seite Seilschlitten, je mit Laserscanner (Z+F IMAGER 5010) und Leica T-Probe 113
5.8	gungsmodell, Werte in [mm]
5.9	Berechnete M3C2-Distanzen zwischen T-Scan und k-TLS-Rollwagen linear interpo- liert, Werte in [mm]
5.10	Berechnete M3C2-Distanzen zwischen T-Scan und k-TLS-Rollwagen iEKF (Glät- tung) Worte in [mm]
5.11	Berechnete M3C2-Distanzen zwischen T-Scan und k-TLS-Seilschlitten ohne Bewe-
5.12	gungsmodell, Werte in [mm]
5.13	poliert, Werte in [mm]
0.10	tung), Werte in [mm]
6.1	Darstellung eines Qualitätssicherungskonzeptes, Abbildung aus Schwieger und Zhang (2010) nach Schweitzen und Schwieger (2011)
6.2	Überblick über die wesentlichen Unsicherheiten beim TLS, die spezifischen Unsicher-
6.3	heiten des k-TLS sind in rot dargestellt (Hartmann und Hartmann, 2022)
6.4	
	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2010). Translationen in [mm] und Botationen in [rad]
6.5	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
$6.5 \\ 6.6 \\ 6.7$	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
$6.5 \\ 6.6 \\ 6.7 \\ 6.8$	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
6.5 6.6 6.7 6.8 6.9	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 6.10	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 6.10 6.11 6.12	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
$\begin{array}{c} 6.5 \\ 6.6 \\ 6.7 \\ 6.8 \\ 6.9 \\ 6.10 \\ 6.11 \\ 6.12 \\ 6.13 \end{array}$	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
$\begin{array}{c} 6.5 \\ 6.6 \\ 6.7 \\ 6.8 \\ 6.9 \\ 6.10 \\ 6.11 \\ 6.12 \\ 6.13 \\ 6.14 \end{array}$	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
 6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 6.10 6.11 6.12 6.13 6.14 A.1 	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
 6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 6.10 6.11 6.12 6.13 6.14 A.1 A.2 	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten
 6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 6.10 6.11 6.12 6.13 6.14 A.1 A.2 A.3 	Histogramme der berechneten Präzision der 6 DoF am Beispiel des Standpunkts 51, Abbildungen aus Ehrhorn (2019). Translationen in [mm] und Rotationen in [rad] 129 Überblick der einzelnen Teilschritte bzw. deren Unsicherheiten

A.5	Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Rollwagen	156
A.6	Verteilung der Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Rollwagen.	156
A.7	Ergebnisse des Zustandsvektors der iEKF-Prozessierung (vorwärts) - Seilschlitten.	157
A.8	Ergebnisse des Zustandsvektors der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Seil-	
	schlitten.	158
A.9	Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts) - Seilschlitten.	159
A.10	Verteilung der Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts) - Seilschlitten	159
A.11	Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Seilschlitten	160
A.12	2 Verteilung der Innovation der iEKF-Prozessierung (vorwärts/rückwärts) - Seilschlitten.	160

Tabellenverzeichnis

2.1	Darstellung der Parameter einer Auswahl von aktuell am Markt verfügbaren Lasers- cannermodellen aus dem High-End-Bereich. Klassifiziert wird nach reinen 2D- oder	
	3D-Modus sowie in kombinierten 2D-/3D-Modus, Leica P40 (Leica, 2016) + RTC360 (Leica, 2018), Z+F IMAGER 5010 (Z+F, 2010) + 5016 (Z+F, 2018), Z+F PROFI-	
	LER 9012 (Z+F, 2012) + 9020 (Z+F, 2022b) und Surphaser 400 (Basis Software,	
	Inc., 2017)	16
$2.2 \\ 2.3$	Auflistung der wesentlichen Sensor-internen Abweichungen bei Laserscannern Angaben zum Distanzrauschen nach Hersteller und Modellen, Leica P40 (Leica, 2016) + RTC360 (Leica, 2018), Z+F IMAGER 5010 (Z+F, 2010) + 5016 (Z+F, 2012) + 6020	18
	$(2018), \Sigma + F PROFILER 9012 (\Sigma + F, 2012) + 9020 (\Sigma + F, 2022b) und Surphaser 400 (Dagia Software, Inc. 2017)$	10
2.4	Unsicherheitsangaben und -spezifikationen aktuell am Markt verfügbarer Lasers- cannermodelle aus dem High-End-Bereich, die Klassifizierung erfolgt in 2D-, 3D- bzw. kombinierten Modus, Leica P40 (Leica, 2016) + RTC360 (Leica, 2018), Z+F IMAGEB 5010 (Z+F 2010) + 5016 (Z+F 2018) Z+F PROFILEB 9012 (Z+F	19
	2012) + 9020 (Z+F, 2022b) und Surphaser 400 (Basis Software, Inc., 2017)	20
2.5	Darstellung der Parameter von scannenden Tachymetern der Hersteller Leica (Leica,	
	2021a) und Trimble (Trimble, 2021)	26
2.6	Parameter und Genauigkeitsangaben des Leica ATS600 (Hexagon, 2021).	27
2.7	Genauigkeitsspezifikationen des Leica AT960 und der 6 DoF-Messung (Hexagon, 2022a)	38
3.1	Klassifikation der Flächen zweiten Grades (3D-Quadriken) nach den Parametern λ_i , m bzw. d , Tabelle aus Drixler (1993, S. 33)	56
4.1	Berechnete Abweichungen zu den Sollwerten (Δ) der Systemkalibrierung.	78
4.2	Berechnete Standardabweichungen (s) der Systemkalibrierung.	78
4.3	Ergebnisse der MCS für eine Systemkalibrierung basierend auf Zylindern, berechnete Abweichungen zu den Sollwerten (Δ) und Standardabweichungen (s)	79
4.4	Ergebnisse der Stationierung des AT960 über fünf Referenzpunkte im Labor des GIH	87
4.5	Restklaffen der Stationierung des AT960 über fünf Referenzpunkte im Labor des GIH. Hinweis: da der Ursprung des Referenzkoordinatensystem außerhalb des Labo-	
	res liegt, weichen die Translationen von den Ausmaßen des Raumes ab	87
4.6	Berechnete und um den halben Durchmesser des verwendeten CCR korrigierte Para-	
	und die Angebe zur Ehenheit dergestellt	00
47	Berechnete Mittelwerte der Cooreferenzierungsmessungen mit dem Leice AT 960 bei	00
4.1	der Systemkalibrierung	89
4.8	Berechnete Standardabweichungen der Mittelwerte, aus den Georeferenzierungsmes-	00
	sungen mit dem Leica AT960 zur T-Probe.	89
4.9	Angaben zu den TLS-Messungen der Systemkalibrierung.	90
4.10	Genauigkeitsangaben für die Horizontalrichtungs- (σ_{hz}) , Vertikalwinkel- (σ_v) und Di- stanzmessung (σ_d) , getrennt nach zugehörigen Datenblatt bzw. dem zum Zeitpunkt	
	der Messung gültigen Kalibrierprotokoll.	91
4.11	Angabe der Koeffizienten des Intensitäts-basierten Modells	92

4.12	Darstellung der pro RE berechneten Mittelwerte der Rohintensitäten und abgeleite- ten Standardabweichungen der Distanzmessung σ_D	92 03
4.13 4.14 4.15	Ergebnisse der Parameterschätzung mit Streckenoffset.	93 93 97
$5.1 \\ 5.2$	Übersicht über die Plattformen und die Parameter der TLS-Messungen am Mockup. Darstellung der Innovationen der iEKF-Prozessierung, vorwärts sowie vorwärts/rückwa (Glättung) - Rollwagen.	113 irts 117
5.3	Darstellung der Innovationen der iEKF-Prozessierung, vorwärts sowie vorwärts/rückwä (Glättung) - Seilschlitten.	irts 120
6.1	Übersicht der Punktnummern der Standpunkte in Tabellenform.	127
6.2	A-posteriori Standardabweichungen der Parameter der Lasertrackerstationierung	134
6.3	Spezifikationen und numerischen Werte der Unsicherheiten der Eingangsgrößen, wel-	
	che für die Modellierung der 3D-Gesamtunsicherheit durch die MCS, verwendet werden	.135
6.4	Korrelation zwischen den Koordinaten zufällig gewählten Punkte 1-4 (Ehrhorn, 2019)	.141
A.1	Auflösungs und Qualitätsstufen, sowie die daraus resultierenden Zeiten eines Volls- cans beim Z+F IMAGER 5016 (Z+F, 2018).	151
A.2	Auflösungsstufen und die daraus resultierenden Zeiten eines Vollscans mit dem Leica BTC360 [Scanner2Go].	151
A.3	Grenzen und Inkremente sowie daraus resultierende Anzahl an Möglichkeiten für die	
	Optimierung der RE-Konstellation im Labor des GIH (Hartmann u. a., 2019)	151
A.4	Bereiche für die Anordnung und Orientierung der RE im Koordinatensystem des	
	Laserscanners (s) (Hartmann u. a., 2019)	152
A.5	Ergebnisse der kombinierten Optimierung aus Hartmann u. a. (2019)	152
A.6	Stationierungsmessung im 3D Labor des GIH - Koordinaten im Lasertrackersystem <i>l</i>	161
A.(Stationierungsmessung im 3D Labor des GIH - Koordinaten im Referenzsystem r .	101
А.0	ieweiligen Standpunktes zum Standpunkt 51 (Ehrhorn 2019)	162
A 9	Signifikanztest ($\alpha = 5\%$) der 6 DoF-Messungen auf Normalverteilung in Bot: Mess-	102
11.0	elemente, die signifikant von der Normalverteilung abweichen (Ehrhorn, 2019).	162
A.10	Präzision der Translation in X, in Rot die Präzisionen, die signifikant ($\alpha = 5\%$)	
	größer sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019).	163
A.11	Präzision der Translation in Y, in Rot die Präzisionen, die signifikant ($\alpha = 5\%$)	
	größer sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019)	163
A.12	Präzision der Translation in Z, in Rot die Präzisionen, die signifikant größer (α =	
	5%) sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	163
A.13	Präzision der Rotation in X, in Rot die Präzisionen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) größer	
	sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019)	163
A.14	Präzision der Rotation in Y, in Rot die Präzisionen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) größer	1.00
A 15	sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019). \ldots sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019). \ldots sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019). \ldots sind als die Herstellerangaben (Ehrhorn, 2019).	163
A.15	Prazision der Rotation in Z, in Rot die Prazisionen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) großer eind als die Herstellenengeben (Ehrhann 2010)	164
Δ 16	Bichtigkeit der Translation in Rot die Abweichungen die signifikant $(\alpha - 5\%)$ größer	104
л.10	sind als 0	164
A.17	Richtigkeit der Rotation für die Punkte [3000.0.0]:[0.3000.0]:[0.3000]. in Rot die	101
_ ,	Abweichungen, die signifikant ($\alpha = 5\%$) größer sind als 0 (Ehrhorn, 2019)	164

Dank

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, welche mich bei der Fertigstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann. Er hat mir die Möglichkeit eröffnet mich intensiv mit der Thematik auseinanderzusetzen. Insbesondere bedanke ich mich für die vielen konstruktiven und intensiven Diskussion. Die hieraus resultierenden Ideen und Anregungen haben mir sehr weiter geholfen.

Herrn Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön und Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Reiterer möchte ich für die Übernahme der Korreferate sowie die wertvollen Anregungen nach der Durchsicht der Arbeit danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Müller danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen des Geodätischen Instituts Hannover bedanke ich mich für die angenehme und kollegiale Arbeitsatmosphäre. Die gemeinsame Zeit mit euch am Institut werde ich in sehr guter Erinnerung behalten. Insbesondere möchte ich mich bei Jens-André Paffenholz und Hamza Alkhatib bedanken, welche mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Auch Sören Vogel, Frederic Hake und Dominik Ernst gilt ein besonderer Dank, da sie mich mit fachlichen Diskussionen und Hilfestellungen sehr unterstützt haben.

Des Weiteren möchte ich mich bei Dr. Hesse und Partner Ingenieure, dem Fraunhofer Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik und bei der Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG für die Zusammenarbeit bedanken. Mein besonderer Dank geht hier an Sören Leitz, Fabian Gierschner und Aaron Bachmann, welche mich bei einigen praktischen und technischen Arbeiten sehr unterstützt haben.

Mein weiterer Dank gilt auch den Studierenden, die mich durch Ihre Abschlussarbeiten während meiner Zeit am Geodätischen Institut unterstützt haben.

Ein großes Dankeschön geht schließlich an meine Familie und Freunde, die meinen Weg ermöglicht, begleitet und unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt dabei meiner Frau Franziska, welche mir insbesondere in der Endphase meiner Promotion den Rücken freigehalten hat. Insbesondere für die Fertigstellung dieser Arbeit war dies von unschätzbaren Wert.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Jens Hartmann
Geburstag:	06.01.1981
Geburtsort:	Brandenburg an der Havel
Familienstand:	verheiratet

Berufliche Laufbahn

seit 09.2022	TANDEM-Stelle, Mitarbeiter ALLSAT GmbH Hannover und Hochschule Anhalt (Institut für Geonformation und Vermessung)
11.2012 bis 08.2022	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geodätischen Institut der Leibniz Universität Hannover
08.2004 bis 09.2004	Angestellter beim Katasteramt Brandenburg an der Havel

Ausbildung

07.2010 bis 09.2012	Ausbildung zum höheren technischen Verwaltungsdienst der Fachrichtung Vermessungs- und Liegenschaftswesen am Thüringer Landesamt für Vermessung und Geoinformationen, Abschluss: Vermessungsassessor
10.2004 bis 03.2010	Studium der Geodäsie und Geoinformatik an der Technischen Universität Dresden, Abschluss: Diplom-Ingenieur (univ.)
08.2001 bis 07.2004	Berufsausbildung zum Vermessungstechniker beim Katasteramt Brandenburg an der Havel, Abschluss: Vermessungstechniker
07.2000 bis 04.2001	Wehrdienst Panzergrenadierbataillon 421, Brandenburg an der Havel
1993 bis 2000	Gesamtschule Görden mit gymnasialer Oberstufe in Brandenburg a. d. H., Abschluss: allgemeine Hochschulreife